

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Master en Ingeniería Acústica

---



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA  
SUPERIOR DE GANDIA

**“Análisis de medidas de *Target Strength* dorsal y del comportamiento del atún rojo (*Thunnus thynnus*) en jaulas marinas”**

**TESIS DE MASTER**

Autor:  
**Sara Sainz-Pardo Martí**

Director:  
**Víctor Espinosa Roselló**

**GANDIA, 2010**



# **Análisis de medidas de *Target Strength* dorsal y del comportamiento del atún rojo (*Thunnus thynnus*) en jaulas marinas**

*Autora:* Sara Sainz-Pardo Martí

*Director:* Víctor Espinosa Roselló

*Resumen* — El objetivo de este trabajo es comprender mejor el comportamiento del atún en cautividad y la viabilidad del proceso de alimentación monitoreado empleando técnicas no invasivas. Se analizan las medidas acústicas obtenidas con la ecosonda Simrad EY500 de haz simple a 38 KHz, con medidas dorsales del atún rojo en cautividad (*Thunnus thynnus*), mantenidos en jaulas donde se alimentaban desde febrero a julio de 2005. Las medidas fueron recogidas por el IEO (Instituto Español de Oceanografía), dentro del proyecto Europeo REPRODOTT (Reproducción y domesticación de *Thunnus thynnus*), para observar el comportamiento de 40 especímenes, colocados en una jaula en el mar (25 metros de diámetro y 20 metros de alto). La ecosonda fue colocada hacia abajo en la superficie del mar en el centro de la jaula. A partir de los ecogramas, se estudia el comportamiento del atún (frecuencia de paso a través del haz del transductor, posición durante el periodo de cortejo, movimientos verticales, etc.), y la evolución del Target Strength (TS) medio dorsal durante el período de alimentación de seis meses a la frecuencia seleccionada. La efectividad de las características físicas de la ecosonda (tipo de transductor, frecuencia de funcionamiento, etc.) es discutida.

*Abstract* — The aim of this paper is a better understanding of tuna behavior in captivity and the feasibility of the feeding process monitoring using non-invasive techniques. We analyze the acoustical recordings obtained with the Simrad EY500 single beam echosounder at 38 KHz, with dorsal measurements of captive Bluefin Tuna (*Thunnus thynnus*) kept in feeding cages from February to July 2005. The measurements were taken by the IEO (Spanish Institute of Oceanography) in the frame of the REPRODOTT (Reproduction and Domestication of *Thunnus thynnus*) European project, to monitor the behavior of forty specimens, placed in a sea cage (25 meters of diameter and 20 meters of high). The echosounder was placed down-looking on the sea surface in the center of the cage. From the echograms, we studied the tuna behavior (frequency of passage through the transducer beam, position during the courtship period, vertical movements, etc), and the evolution of the average of dorsal target-strength (TS) during the six months feeding period at the selected frequency. The effectiveness of the physical characteristics of the echosounder (transducer type, operation frequency, etc) is discussed.

Autor: Sara Sainz-Pardo Martí, email: sasaimar@epsg.upv.es  
Fecha de entrega: 6-9-2010

**ÍNDICE**

<b>I. Introducción.....</b>	<b>4</b>
I.1. El atún rojo ( <i>Thunnus Thynnus</i> ).....	4
I.2. Antecedentes y realización de medidas por el Instituto Español de Oceanografía.....	4
<b>II. Introducción teórica.....</b>	<b>6</b>
II.1. La ecosonda científica.....	6
II.2. La ecuación del sónar.....	7
II.3. Medida del TS (Target Strength).....	8
II.4. Campo cercano y campo lejano del transductor.....	9
<b>III. Material empleado y montaje.....</b>	<b>10</b>
<b>IV. Datos biométricos.....</b>	<b>12</b>
IV.1. Longitud y peso.....	12
IV.2. Campo cercano y campo lejano del blanco.....	13
<b>V. Análisis con Sonar5_Pro.....</b>	<b>15</b>
V.1. Interpretación de los ecogramas obtenidos.....	15
V.2. Conversión de archivos y función TVG.....	18
V.3. Filtro de eliminación de ruido.....	19
V.4. Tracking y fish baskets.....	20
<b>VI. Resultados.....</b>	<b>23</b>
VI.1. Horas de funcionamiento de la ecosonda.....	23
VI.2. Detecciones recogidas por la ecosonda.....	24
VI.3. TS medio de las trazas.....	25
VI.4. TS máximo de las trazas.....	27
VI.5. TS medio de los ecos.....	29
VI.6. TS versus profundidad.....	31
VI.7. Movimientos verticales.....	32
VI.8. Monitoreado del periodo de cortejo.....	37
<b>VII. Conclusiones.....</b>	<b>40</b>
VII.1. Conclusiones.....	40
VII.2. Líneas futuras.....	40

<b>Agradecimientos.....</b>	<b>42</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>43</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>44</b>
<b>Anexo 1: Datos morfológicos de los atunes.....</b>	<b>44</b>
<b>Anexo 2: Especificaciones de la ecosonda Simrad EY500.....</b>	<b>45</b>
<b>Anexo 3: Dorsal TS measurement analysis and tuna behavior in sea cages.....</b>	<b>49</b>

## 1 INTRODUCCIÓN

### I.1. EL ATÚN ROJO (*THUNNUS THYNNUS*)

El atún rojo o común (*Thunnus thynnus*) es una especie de atún que vive en el oeste del Océano Atlántico, este del Mar Mediterráneo y el Mar Negro.

Es el atún por excelencia. Puede alcanzar tres metros de longitud y 600 kg de peso. Es un pez pelágico, que pasa su vida en aguas libres, y se alimenta básicamente de otros peces más pequeños, entre ellos sardinas, caballas, y jureles.

Es un pescado codiciado debido a los precios que puede alcanzar en el mercado, sobretodo en Japón. Actualmente hay empresas que los capturan vivos para después engordarlos en jaulas en alta mar. Los músculos que impulsan sus migraciones se han convertido en una delicia gastronómica y una fuente de riqueza para los pescadores. Como consecuencia, la demanda por los atunes de aleta azul, por ejemplo, es tan grande que su precio ha adquirido niveles exorbitantes en las últimas décadas.

En el Atlántico occidental la población atunera ha sufrido una disminución del 90% desde el decenio de 1970, según cifras de la Comisión Internacional para la Conservación Atún Atlántico (ICCAT). En el Mediterráneo se calcula que esa declinación es de alrededor de un 50%, aunque en ambos casos se ha acelerado en los últimos años [1,4].

### I.2. ANTECEDENTES Y REALIZACIÓN DE MEDIDAS POR EL INSTITUTO ESPAÑOL DE OCEANOGRAFÍA

Desde los años noventa, el engorde de atún rojo (*Thunnus thynnus*) ha sido estudiado en el Mediterráneo, principalmente en la Región de Murcia. Por ello, investigadores del IEO (Instituto Español de Oceanografía) querían controlar el comportamiento del atún rojo durante el desove de 40 especímenes capturados con el fin de llevar a cabo el proyecto REPRODOTT (Reproducción y domesticación de *Thunnus thynnus*) quinto proyecto del Programa del Marco Europeo. Se capturaron los individuos adultos en las zonas de desove entre mayo y julio y fueron transportados a jaulas flotantes. Allí el atún se alimenta activamente con pescado crudo de bajo coste con el fin de aumentar su contenido de grasa y venderlo a un precio muy alto en el mercado japonés. El interés del estudio se centró en las posibles actividades de cortejo que los atunes realizan cerca de la superficie y que tiene lugar entre las últimas semanas de junio y la primera de julio.



Ilustración 1 Jaulas de cría científica del IEO en la costa de Cartagena (Murcia)



Ilustración 2 Técnicos del IEO alimentando a los atunes

Es bien sabido que sistemas acústicos como ecosondas se puede utilizar como una herramienta no invasiva para observar el comportamiento de los peces, para obtener información del TS (Target Strength), estimaciones de biomasa, observar la distribución espacio-temporal, etc. En este proyecto se empleó una ecosonda de haz simple (single beam) durante el período comprendido entre febrero a julio de 2005, colocada en la superficie de una jaula donde el atún es alimentado.

Análisis preliminares a los resultados detectaron movimientos verticales que coincidían con la alimentación diaria, así como movimientos característicos dependiendo del ciclo del atún. En este trabajo se ha ampliado el análisis para determinar la evolución de la distribución de TS durante el periodo de alimentación, y también encontrar algunos indicadores de la actividad de los peces durante el período de cortejo, como la tasa y la velocidad de paso del atún a través del haz acústico y la posición vertical manteniendo por ellos durante las horas de la actividad [4].

Este trabajo se ha realizado a partir de información de diferentes especies de atún, pero hay una importante falta de información acerca del atún rojo.

## II. INTRODUCCIÓN TEÓRICA

A continuación se describen algunos conceptos importantes para la realización de este estudio. Sirve, además, como conocimiento previo para entender cómo se obtienen las medidas acústicas.

### II.1. LA ECOSONDA CIENTÍFICA

El sistema SONAR (Sound and NAVigation and Ranging) se emplea en acústica submarina para la observación y detección a distancia de objetos en el agua. La ecosonda es un tipo de sónar en el cual un haz acústico es transmitido verticalmente. Algunos tipos de sónar y ecosondas se utilizan para la detección y observación de peces.

Los sistemas sonar se pueden dividir en dos grandes grupos: sónar pasivo y sónar activo. El sónar pasivo está diseñado para localizar el blanco mediante la captación de sonido radiado por el propio blanco. Mientras que, el sónar activo detecta y procesa los ecos recibidos de la señal acústica que el mismo ha radiado.

Un sistema sónar consiste en un transmisor, un receptor, un transductor y un display donde se visualicen los ecos detectados. El transmisor propaga pulsos de sonido a través del agua donde encontrará diferentes objetos a detectar. Esos objetos reflejan o dispersan energía y parte de ésta vuelve al transductor. El transductor detecta el sonido reflejado (ecos) y convierte la señal recibida en energía eléctrica. El tiempo transcurrido entre la emisión y recepción del pulso informa de la distancia a la que se encuentra el blanco desde el transductor. La señal recibida es amplificada en el receptor por circuitos eléctricos y mostrada en el ecograma [2, 8].

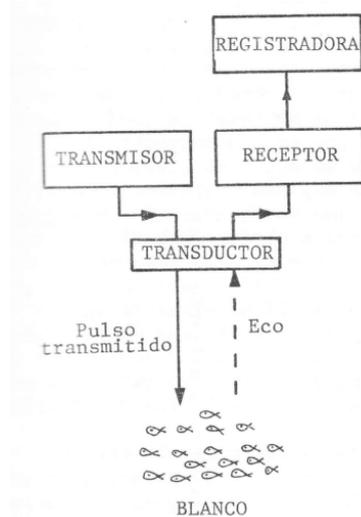


Figura 1 Esquema básico de una ecosonda

En el ecograma se muestran las señales de gran amplitud como marcas oscuras sobre un fondo blanco. De esta forma se representan los objetos detectados y se muestra su profundidad o rango desde la marca de transmisión, es decir, desde el transductor.

Después de un cierto tiempo, el transmisor emite otro pulso y el proceso se repite una vez más. El resultado se muestra en una imagen bidimensional mediante trazas formadas por ecos conectados. La posición vertical de la traza indica la profundidad a la que se encuentra el blanco, mientras que la posición horizontal muestra variaciones en el tiempo si la ecosonda se encuentra en una posición fija, o variaciones en el espacio si la ecosonda está montada en una embarcación móvil. La amplitud del eco se representa mediante una escala de colores.

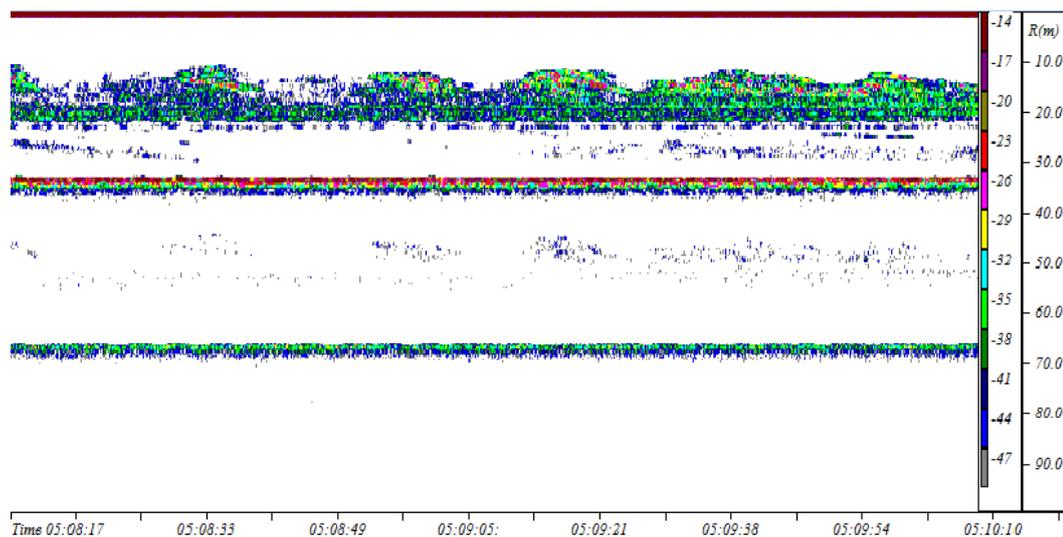


Ilustración 3 Ejemplo de un ecograma

Las ecosondas científicas son capaces de obtener y registrar valores de ecos con un sistema de calibrado que proporciona mayor precisión. La electrónica de este tipo de ecosondas ha sido diseñada con amplitud estable y con algunas características adicionales, como un amplificador preciso de ganancia variable con el tiempo (TVG). El amplificador compensa la señal por las pérdidas producidas, debidas a la divergencia geométrica del haz y la absorción del medio de propagación. La señal que se obtiene es suficientemente precisa para contar peces individuales o para medir densidad de agregaciones de peces. Para obtener una señal proporcional a la densidad de peces es necesario un integrador de ecos, que suelen llevar incorporado las ecosondas modernas, o pueden conectarse por separado.

## II.2. LA ECUACIÓN DEL SÓNAR

En las aplicaciones de acústica submarina el proceso crítico es la detección de la señal acústica en un ambiente ruidoso. Se considera que se ha detectado un eco cuando el nivel de la señal recibida

excede un nivel umbral determinado. La ecuación del sónar puede escribirse de forma simplificada como:

$$EL \geq DNL + DT(dB_{ref}P_{ref}) \quad (1)$$

donde  $EL$  es el nivel de eco,  $DNL$  es el nivel de ruido detectado y  $DT$  el umbral de detección.

En este estudio se han realizado las medidas con una ecosonda científica, es decir, un sistema activo. En estos sistemas la señal es un pulso de energía acústica que se origina en el transmisor con un nivel de fuente  $SL$ . Esta señal viaja después al blanco, acumulando una pérdida por transmisión en un solo sentido  $TL$ . En el blanco, parte de la señal incidente se refleja hacia la fuente, de manera que sufre una segunda pérdida por transmisión  $TL'$  hasta que llega la receptor. Si la fuente y el receptor están en la misma posición tenemos que  $TL = TL'$  y por lo tanto se puede expresar como:

$$EL = SL - 2TL + TS(dB_{ref}P_{ref}) \quad (2)$$

Al determinar el tiempo  $t$  entre la emisión de un pulso y la recepción del eco, se puede conocer la distancia  $r$  a la que se encuentra el blanco  $r = ct/2$ .

El nivel de ruido detectado por un sistema activo puede ser dominado por el ruido ambiente o por el propio ruido (auto-ruido). De esta forma, la ecuación del sónar que está limitado por ruido se puede escribir de la siguiente manera:

$$SL - 2TL + TS \geq NL - DI + DT(dB_{ref}P_{ref}) \quad (3)$$

donde  $NL$  es el nivel de ruido y  $DI$  el índice de directividad.

Para el sónar activo hay una fuente adicional de enmascaramiento que no está presente en el sónar pasivo, ésta es la reverberación. La reverberación surge de la dispersión de la señal emitida por blancos indeseables como burbujas, la superficie del mar, etc. Si el sónar está limitado por la reverberación la ecuación que sigue es la siguiente:

$$SL - 2TL + TS \geq RL + DT(dB_{ref}P_{ref}) \quad (4)$$

donde  $RL$  es el nivel de reverberación.

Si un sistema sónar activo está dominado por el ruido o por la reverberación depende de la potencia acústica, el alcance y la velocidad del blanco [11].

### II.3. MEDIDA DEL *TS* (*TARGET STRENGTH*)

El sónar activo emite energía acústica en el agua con el fin de detectar objetos a partir de los ecos que éstos devuelven al transductor, la intensidad de los ecos dependen de la proporción de sonido reflejado y captado por el receptor. El Target Strength ( $TS$ ) de un objeto es una medida cuantitativa de sus características reflectoras y está definido como:

$$TS = 10 \log \left( \frac{I_r}{I_i} \right) \quad (5)$$

donde  $I_r$  es la intensidad de las ondas reflejadas a 1 m del blanco, e  $I_i$  es la intensidad de las ondas incidentes a 1 m del blanco. Si asumimos que el sonido se propaga esféricamente y no hay pérdidas,  $I_r$  será directamente proporcional a  $I_i$ :

$$I_r = \left(\frac{\sigma}{4\pi}\right) \frac{I_i}{r^2} \quad (6)$$

$\sigma$  está definido como la sección transversal acústica del blanco, y  $4\pi r^2$  es el área superficial de la esfera a través de la cual toda la energía incidente es reflejada.  $\sigma$  depende del tamaño, forma y orientación del blanco, y en general, varía con el ángulo entre la dirección incidente y la dirección del receptor [14]. Combinando ambas ecuaciones se obtiene:

$$TS = 10 \log \left( \frac{\sigma}{4\pi r^2} \right) \quad (7)$$

#### II.4. CAMPO CERCANO Y CAMPO LEJANO DEL TRANSDUCTOR

Para tener unos valores de TS fiables debemos saber dónde colocar el transductor, por lo tanto debemos saber dónde se va a medir, es decir, a qué distancia se encuentran los peces.

El TS está definido en el campo lejano del transductor y en el campo lejano del objeto a detectar, es decir, detrás de los respectivos campos cercanos.

El campo cercano del transductor se define como:

$$(R_N)_{Transducer} = \frac{d^2}{\lambda} \quad (8)$$

donde  $d$  es el mayor diámetro del transductor, y  $\lambda$  es la longitud de onda. Para distancias mayores que  $R_N$ , la presión acústica decrece inversamente con la distancia [3]. En nuestro caso la máxima longitud del transductor es 0.31 metros, por lo tanto el campo cercano del transductor son 2.44 metros. Las medidas que se analizarán posteriormente son las detectadas por detrás de esta distancia.

### III. MATERIAL EMPLEADO Y MONTAJE

Las medidas fueron tomadas con una ecosonda modelo EY500 de Simrad. La ecosonda fue colocada en dirección hacia abajo en la superficie del agua y en el centro de la jaula, sujeta a una plataforma y conectada al transceptor. La jaula tenía unas dimensiones de 25 metros de diámetro y 20 metros de profundidad. El haz acústico insonifica a una profundidad de 20 metros desde la superficie, es decir, en la base de la jaula, de  $23.52 \text{ m}^2$  como se puede observar en la Figura 2. Esta área disminuye conforme nos acercamos a la superficie.

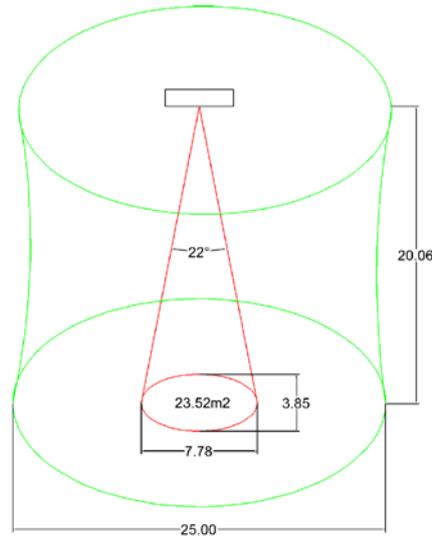


Figura 2 Área insonificada por el transductor dentro de la jaula

Se trabajó con un transductor elíptico de haz simple que a 38 KHz, su patrón de directividad se muestra en la Figura 3 y 4.

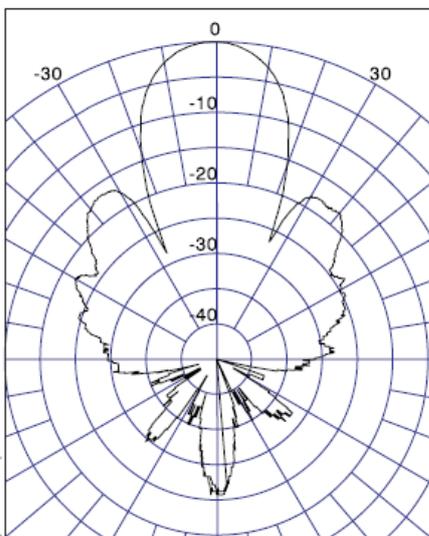


Figura 3 Patrón del haz transversal a 38 KHz

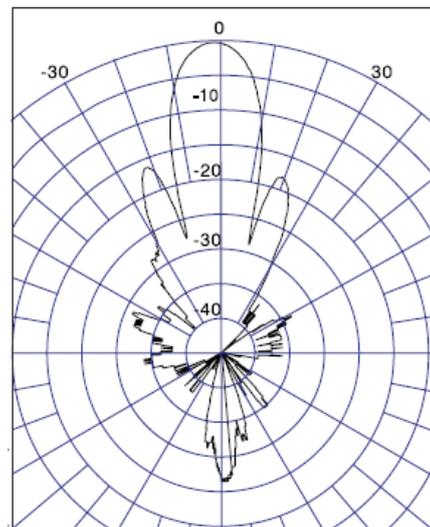


Figura 4 Patrón del haz longitudinal a 38 KHz

Los parámetros del transductor y la configuración de la ecosonda se muestran en la Tabla 1.

<i>Parámetros de calibración</i>	<i>Valor</i>
Two-way beam angle (dB)	-14
TS Ganancia del transductor (dB)	20
Sv Ganancia del transductor (dB)	20
Potencia eléctrica (W)	500
Ancho del pulso (ms)	1
Frecuencia del transductor (KHz)	38
Ancho de haz (grados)	22 x 11
Ángulo de sensibilidad (grados)	13
Tipo de haz	Haz simple

Tabla 1 Parámetros del transductor y de la ecosonda

Las condiciones ambientales que se dieron en el momento de realizar las medidas se muestran en la Tabla 2.

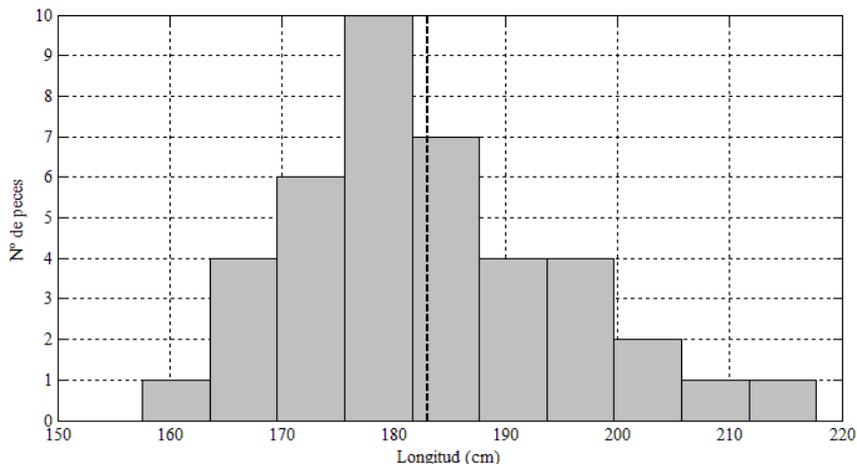
Condición ambiental	Valor
<i>Temperatura media del agua (°C)</i>	13.3
<i>Salinidad (ppm)</i>	32
<i>pH del agua</i>	8
<i>Coefficiente de absorción (dB/km)</i>	8.7
<i>Velocidad del sonido en el agua (m/s)</i>	1497.71

Tabla 2 Condiciones ambientales

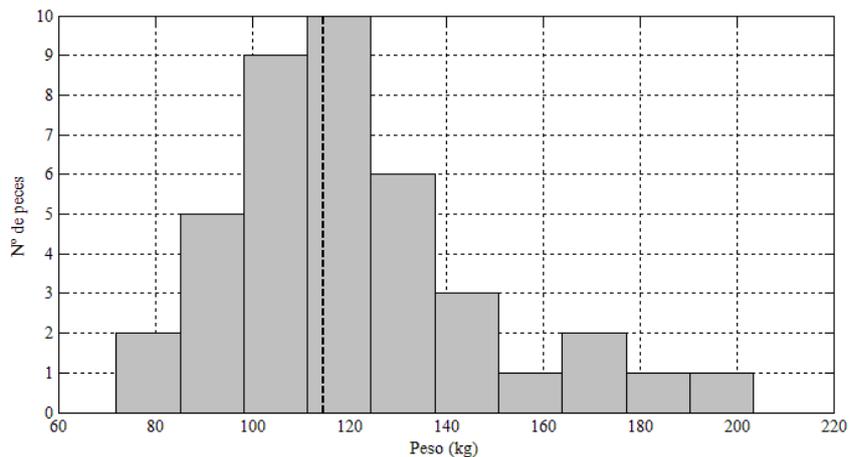
## IV. DATOS BIOMÉTRICOS

### IV.1. LONGITUD Y PESO

El tamaño y las características del atún impiden manipularlos con facilidad para obtener medidas biométricas durante el periodo de alimentación. Una solución a este problema sería un sistema de video que permita obtener información morfológica del atún y así obtener una distribución previa al sacrificio de los peces. Por lo tanto, en este estudio se obtuvieron los datos morfológicos que se muestran en la Gráfica 1 y la distribución de pesos, mostrada en la Gráfica 2, de cada uno de los atunes que contenía la jaula cuando finalizó el período de medidas.



Gráfica 1 Histograma Longitud (FL) frente al número de peces y barra promedio



Gráfica 2 Histograma Peso frente al número de peces y barra promedio

El número de peces de los que se dispone en la jaula es de 40 individuos. Como se puede observar en la Gráfica 1 hay un máximo cerca de 180 cm con una cantidad de 10 individuos. En la Gráfica 2 se observan un máximo nuevamente cerca de 120 Kg. En ambos el número de individuos

que les corresponde es de 10. La longitud (*Fork Length*) media es de 183 cm con una desviación estándar del 7%, el peso medio es de 117 kg con una desviación estándar del 24%.

Para estimar el peso de un pez a partir de su longitud en centímetros se emplean dos ecuaciones:

$$1: \text{Peso}(g) = u_2 \cdot P \cdot (u_3 \cdot \text{Longitud}(cm))^Q \quad (9)$$

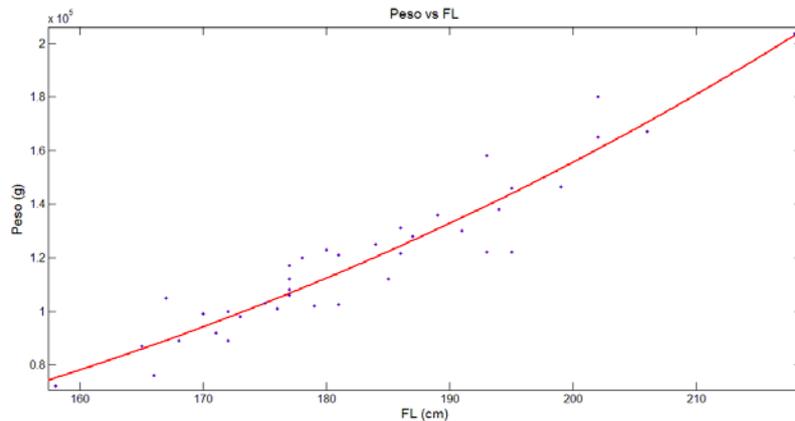
$$2: \text{Peso}(g) = u_2 \cdot e^{P+Q \cdot \ln(u_3 \cdot \text{Longitud}(cm)+R)} \quad (10)$$

Estas dos ecuaciones se emplean en el software Sonar5-Pro para realizar cálculos de biomasa. La primera ecuación es la más empleada y la que se ha utilizado para obtener los coeficientes buscados P y Q. Se asumen los coeficientes  $u_2$  y  $u_3$  iguales a 1. De esta forma se resuelve la regresión exponencial con la herramienta *cftool* de MATLAB. La ecuación en modo potencial es:

$$y = a \cdot x^b \quad (11)$$

mientras que el modelo lineal es:

$$\ln(y) = \ln(a) + b \cdot \ln(x) \quad (12)$$



Gráfica 3 Recta de regresión Peso versus Longitud (FL)

Los coeficientes obtenidos con el 95% de intervalo de confianza son:

$$a = 0.0122 \quad (-0.009135, 0.03354)$$

$$b = 3.088 \quad (2.754, 3.422)$$

Para comprobar la bondad del ajuste se calcula el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), siendo de 0.8952. Al ser un valor cercano a 1 se puede decir que hay una buena correlación lineal. Por lo tanto, estos datos son válidos para estimar pesos de un pez a partir de su longitud.

#### IV.2. CAMPO CERCANO Y CAMPO LEJANO DEL BLANCO

Anteriormente, en el apartado II.4, se ha calculado el campo cercano del transductor, es decir, la distancia a partir de la que se debe medir para obtener unos valores fiables de TS. En este apartado se mide el campo cercano de un blanco u objeto que está definido como:

$$(R_N)_{Blanco} = \frac{l^2}{\lambda} \quad (13)$$

donde  $l$  es la máxima dimensión del blanco [3]. En nuestro caso, nos fijamos en la distancia FL (Fork Length) que mide la largura del pez desde la boca hasta la cola. El mayor valor de FL es 2.18 metros, por lo tanto el campo cercano del blanco es 120.57 metros. No se mide en el campo lejano del blanco, pues la máxima longitud a la que se tomaron las medidas son los 20 metros que tiene la jaula de profundidad. Esta es una condición que no se cumple en la mayoría de estudios de TS en jaulas debido a las dimensiones de los peces y la geometría de las instalaciones.

## V. ANÁLISIS CON SONAR5\_PRO

El Sonar5\_Pro es un software de post-procesado implementado por el Dr. Helge Balk, profesor de la Universidad de Oslo. Es una herramienta de post-procesado de datos que se empleó para la detección de ecos y para hacer medidas de TS de los datos acústicos. Este software se puede emplear para tres tareas principales: estimación de abundancia, que incluye estimación de biomasa y conteo de trazas; estudios de comportamiento de las especies; y estudios físicos como la propagación del sonido, etc. Está especialmente diseñado para identificar y hacer recuento de trazas mediante las llamadas *fish-baskets* [5, 6].

La Ilustración 4 muestra la ventana principal del software Sonar5\_Pro. Se trata de un visualizador en el que se puede “ver” lo que está pasando en el agua y lo que fue detectado por el detector de amplitud de la ecosonda (ecograma AMP) y por el detector de ecos simples (ecograma SED). Un ecograma SED se puede emplear para la detección de ecos simples y métodos de rastreo (*tracking*) y un ecograma AMP puede emplearse para el análisis de la imagen.

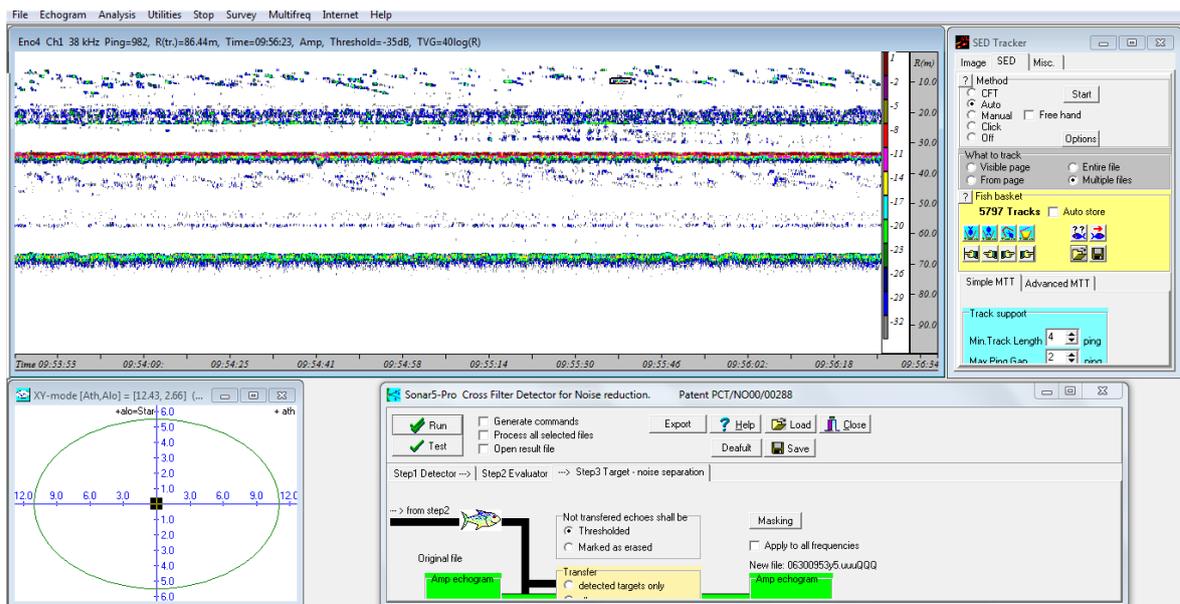


Ilustración 4 Interfaz del Sonar5\_Pro

### V.1. INTERPRETACIÓN DE ECOGRAMAS OBTENIDOS

A partir de los ecogramas obtenidos se pueden sacar diferentes conclusiones relacionadas con la morfología de un individuo y su comportamiento. Se ha trabajado con todos los ecogramas que se disponían, excepto con los que tenían ruido. Este ruido puede ser causado por un mal funcionamiento de la ecosonda, malas conexiones o por ruido proveniente de un aparato electrónico ajeno. Un extracto de ecograma AMP se muestra en la Ilustración 5.

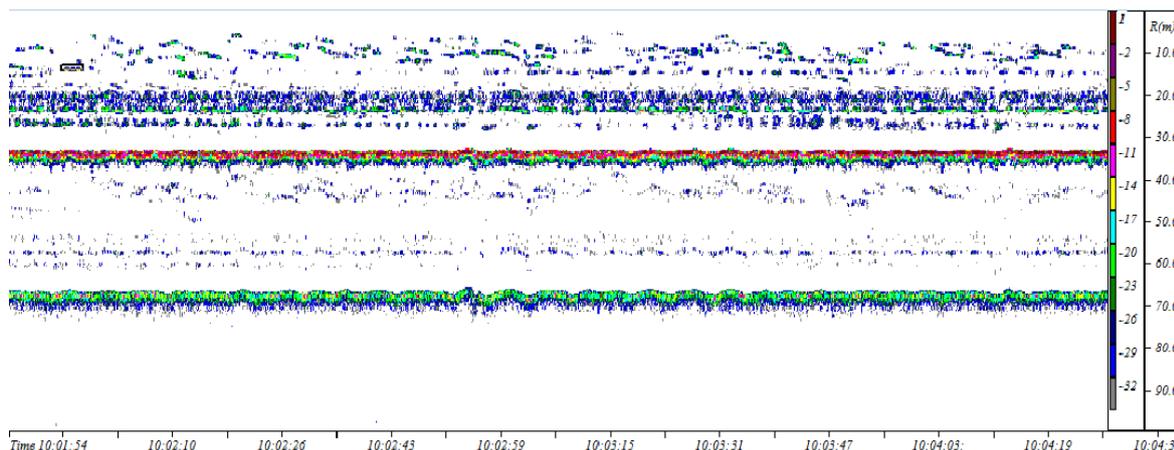


Ilustración 5 Ecograma AMP del día 30 de junio a las 10:02 horas

En este ecograma AMP se ha aplicado un umbral de  $-35$  dB y la función TVG es  $40\log(R)$ . Se pueden observar diferentes capas. En primer lugar y empezando por la parte superior se observan trazas de diferentes longitudes, pero que tienen una intensidad similar, éstas corresponden a los ecos que se reciben de los peces. Después se distingue una franja cerca de los 20 metros de profundidad, correspondiente a la intensidad devuelta al transductor del fondo de la jaula. Sobre los 30 metros de profundidad se observa una franja con mucha intensidad correspondiente al fondo marino. Nosotros trabajamos dentro de la jaula, por lo tanto se establece una zona pelágica entre los 2.44 metros respecto al transductor y 20 metros. En la Ilustración 6 se muestra la zona de interés en el rango entre 0 y 22 metros de profundidad, señalando la zona pelágica

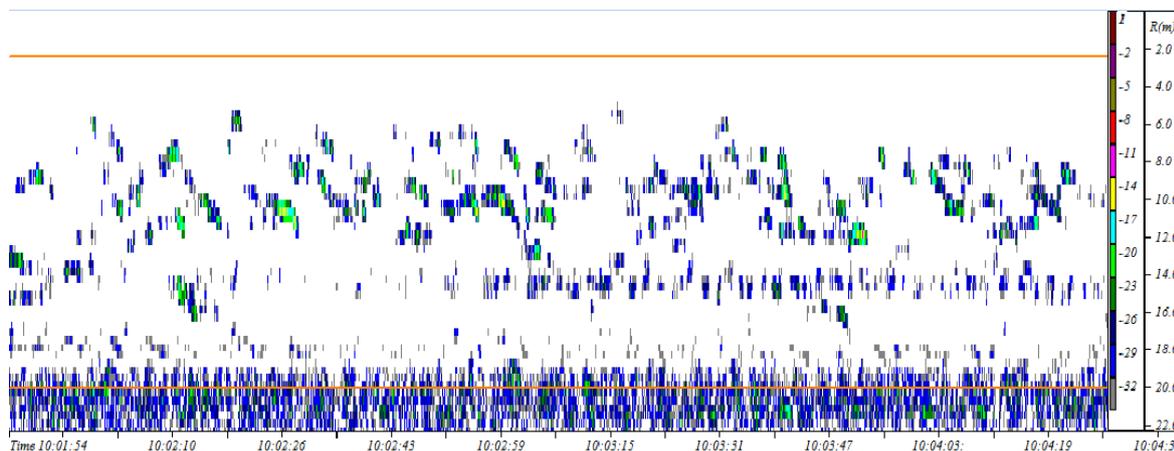


Ilustración 6 Vista de la zona pelágica

Como se ha comentado anteriormente hay dos posibilidades de visualizar un ecograma dependiendo del tipo de análisis, con el modo AMP mostrado en la Ilustración 5 y 6 y con el modo SED mostrado en la Ilustración 7.

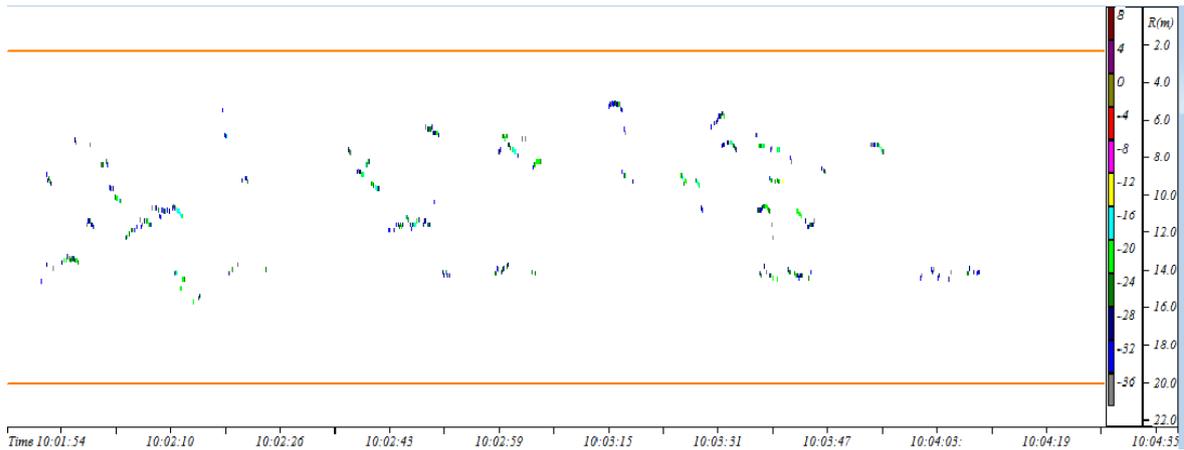


Ilustración 7 Ecograma SED

Cada una de las trazas dibujadas en el ecograma SED está formado por un número de ecos pertenecientes a un pez que ha atravesado el haz acústico en un determinado espacio de tiempo. Debemos fijarnos en los ecos que forman trazas, pues el resto de ellos son tomados como ruido indeseado y será eliminado con un determinado tipo de filtro. Como se puede observar cada una de las trazas tiene una forma diferente, esto se debe a la trayectoria que ha tomado el pez a su paso por el haz, siendo diferente si atraviesa el centro del haz o si pasa por uno de sus laterales.

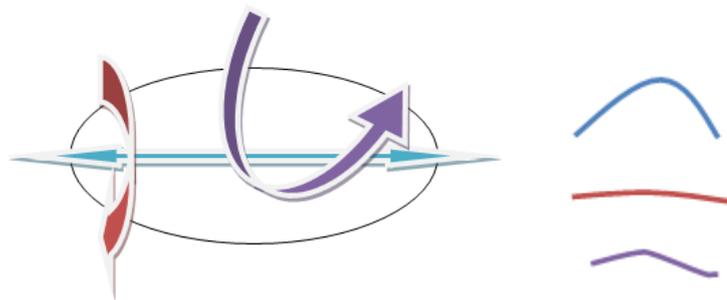


Ilustración 8 Trayectoria de los peces y traza correspondiente

Por otro lado, la velocidad a la que se mueve el pez influirá en el tipo de traza, siendo más larga si el pez circula a menor velocidad, ya que la traza de este pez será registrada por un mayor número de pings. Un ecograma en el que se puede observar este efecto sería el siguiente:

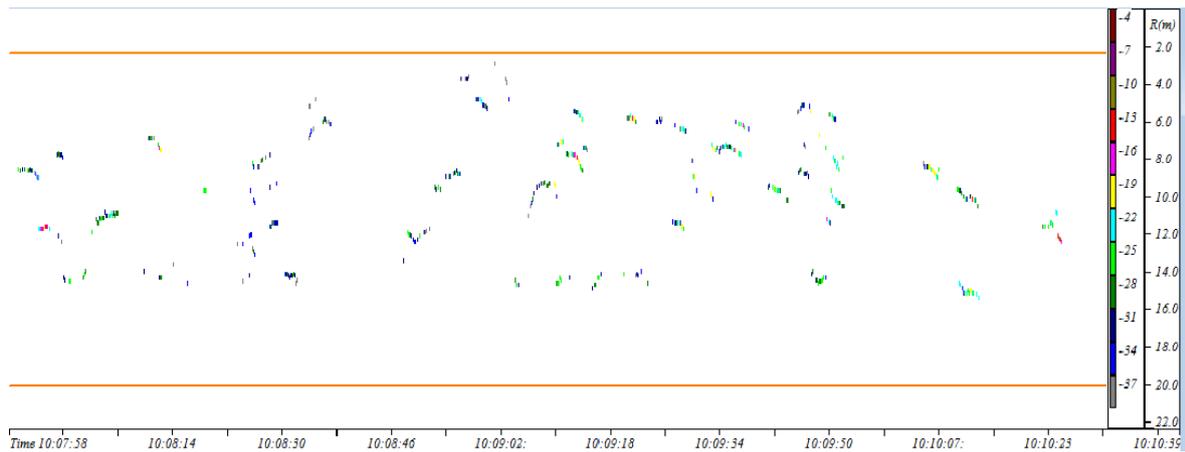


Ilustración 9 Ecograma SED del día 30 de junio a las 10:07 horas

En este ecograma se observa que hay trazas de diferentes tamaños. Según los datos ofrecidos por el IEO se sabe que sobre las 10:00 horas los atunes eran alimentados, por lo que personal del IEO echaba pequeños peces dentro de la jaula. La ecosonda es capaz de detectar estos peces más pequeños además de los atunes, así como la detección de burbujas provenientes del fondo marino.

Se puede decir que las trazas más cortas pertenecen a los atunes que se mueven a mayor velocidad a buscar comida, mientras que las más largas se pueden deber a los peces que se les da como alimento, estas son las que van a menor velocidad ya que se dejan caer al agua y descienden hacia el fondo.

Por otra parte se observa que las trazas se localizan en un rango más corto, es decir, más cercanas al transductor y por lo tanto a la superficie. Ese hecho intuye pensar que dependiendo de la franja horaria los peces se mantendrán situados en un determinado rango. De esta forma se puede establecer un criterio de detección de biomasa por tramos según la hora para todo el volumen de la jaula.

## V.2. CONVERSIÓN DE ARCHIVOS Y FUNCIÓN TVG

Los ficheros con los que trabajamos se convierten a la extensión \*.uuu propia del Sonar5\_Pro. A partir de éstos se modifica el rango de todos los archivos aplicando un algoritmo de corrección de la función TVG (*Time-Varied-Gain*). Este algoritmo proporciona una ganancia variable en función del tiempo que compensa las pérdidas de señal producidas por la divergencia geométrica del haz y la absorción del medio de propagación, es decir, se compensa la dependencia del nivel del eco con la distancia. Para obtener una señal de ecos cuya amplitud solo dependa de las propiedades del blanco y no de la distancia al blanco, se compensa la reducción de intensidad debidas a las pérdidas por propagación [2, 6, 8]. La función TVG se puede definir como:

$$TVG(s)_{sv} = 20 \log(r) + 2\alpha r \quad (14)$$

$$TVG(s)_{TS} = 40 \log(r) + 2\alpha r \quad (15)$$

La ecuación (9) se emplea para representar en el ecograma blancos extensos que dispersan el sonido hacia la fuente, lo que es conocido como *volume backscattering strength*. La ecuación (10) se emplea para representar el TS de un blanco puntual [7].

### V.3. FILTRO DE ELIMINACIÓN DE RUIDO

Como se ha comentado anteriormente los ecogramas están compuestos por los ecos devueltos por los peces bajo estudio y de ruido. Las señales de ruido enmascaran las ecos y esto interfiere en la correcta detección de trazas o peces. El ruido que se observa es una combinación de ruido ambiental, reverberación y auto-ruido del equipo o de equipos cercanos a la ecosonda.

Es aconsejable eliminar este ruido protegiendo las formas de las trazas que se van a estudiar. Mediante Sonar5\_Pro se implementa un filtro de cruce (*Crossfilter*) que permite separar el objeto a detectar del ruido. Previamente a la ejecución del filtro de eliminación de ruido se establecen unos criterios de umbrales en la visualización de los ecogramas, diferenciados en ecograma SED y ecograma AMP. Para poder contrastar los resultados se han aplicado 3 umbrales diferentes cuyas características se muestran en la Tabla 3. Estas diferencias permiten obtener un valor diferente de TS, así como de muestras detectadas.

Nº umbral	Ecograma SED	Ecograma AMP
1	-40	-35
2	-40	-40
3	-30	-30

Tabla 3 Características de los umbrales aplicados

Una vez aplicado un umbral se implementa el filtro de eliminación de ruido. Este proceso consta de 3 pasos:

- Paso 1: A partir del ecograma de amplificación se realiza un filtrado de detección con los parámetros de la Tabla 4.

Filtro de primer plano	Valor	Filtro de segundo plano	Valor
Altura	1	Altura	10
Anchura	1	Anchura	1

Tabla 4 Características Crossfilter (detección de trazas)

Posteriormente al filtro de segundo plano se amplifica el nivel con 5 dB. Luego se combinan los dos filtros y se detectan los objetos en forma de traza.

- Paso 2: Se evalúan los objetos detectados y se desechan las detecciones indeseadas. Nuestras trazas deseadas tienen las características de la Tabla 5.

Características de las detecciones	Valor	
	Mínimo	Máximo
Perimeter length (pings)	1	400
Track length (pings)	4	30
Mean echo length	0.8	5
Mean Intensity (dB)	-40	0

Tabla 5 Características de las trazas detectadas

Estas características actúan como un filtro, es decir, los objetos detectados que sea menor que el mínimo o mayor que el máximo valor son eliminados. Estas características fueron elegidas para asegurarnos de captar el TS del atún y evitar captar ecos indeseados. En el caso del *track length* se marcó 4 pings como mínimo para tener en cuenta únicamente las trazas completas de atunes. El *mean echo length* se adaptó a las medidas morfológicas máximas del atún y al tamaño del pulso que transmite la ecosonda. El *mean intensity* es amplio para tener en cuenta todas las posibles trazas.

- Paso 3: Se diferencia entre el blanco y el ruido, transfiriéndose los blancos u objetos detectados. Del ecograma AMP se transfiere todo valor de TS, mientras que del ecograma SED se transfieren únicamente los objetos detectados, eliminando el posible ruido SED de los ecogramas. El valor de TS final se obtiene a partir del ecograma AMP, el ecograma SED sirve a efectos prácticos como orientación de la forma de las trazas y el valor de los ecos por los que está compuesta la traza.

Realizado el filtrado se crea un nuevo archivo con extensión \*.uuuQQ. Estos ficheros serán procesados con tracking y las trazas seleccionadas se colocarán en las *fish baskets*.

#### V.4. TRACKING Y FISH BASKETS

El *tracking*, o rastreo, es el proceso de combinar ecos sucesivos de los diferentes blancos en trazas. Los ecos con los que se trabaja y los que se emplean para hacer una traza pueden ser ecos de detecciones simples obtenidos del ecograma SED o grupos de muestras con una intensidad por encima del nivel de reverberación de fondo obtenidos del ecograma AMP [6]. El software ofrece distintas modalidades de realizar el *tracking*, en este estudio se ha elegido el tracking automático.

Cuando una serie de ecos se combinan forman una traza. Siempre que exista una traza ésta puede ser dibujada o enmarcada en el ecograma y también en el diagrama de posición<sup>1</sup>. Las características de la traza pueden ser calculadas, tales como el TS promedio y la velocidad, a partir de las posiciones de los ecos simples en la traza.

Se fijan umbrales para que diferencie entre una traza o varias a partir de los parámetros recogidos en la Tabla 6.

Características de las trazas	Valor
Min. Track Length	4
Max. Ping gap (pings)	2
Gating Range	0.4

Tabla 6 Características de las trazas

Las características que forman las trazas se fijan a partir de diferentes parámetros. El *min. track length* es la mínima longitud que debe tener una traza, si es más pequeña se elimina como si fuera ruido; el *max ping gap* indica el número de ecos perdidos máximo que puede haber en una traza, por ello mismo es de pequeño valor, para que considere trazas lo más completas posible; el *gating range* define el espacio mínimo vertical entre trazas, en este caso 0.4 metros verticales, suponiendo que ecos más cercanas a esta distancia forman una misma traza.

Una vez definidas las trazas se van introduciendo de forma automática en la ventana de clasificación de las *fish baskets*. Las llamadas *fish baskets* tienen 3 propósitos: almacenar trazas, generar estadísticas de las trazas y establecer un sistema de clasificación de trazas.

Obtenidas las trazas se eligen los parámetros que las definen “Ilustración 10”. En este estudio se han seleccionado diferentes parámetros, siendo especialmente útiles son los siguientes:

- Track Date: Fecha en la que fue detectada la traza.
- Track Time: Hora en la que fue detectada la traza.
- No. Echoes: Número de ecos detectados en una traza.
- Mean TSc: Target Strength medio compensado fuera del eje (off-axis),

$$mTSc = \overline{TSc} = 10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n TSi \right).$$

Si se trabaja con una ecosonda de haz simple (single-beam) TSc=TSu (uncompensated), ya que no tienen referencia angular.

- Max. TSc: TS de mayor valor en la traza.

<sup>1</sup> La traza es dibujada en el diagrama de posición siempre que las medidas se hayan realizado con un transductor dual-beam o split-beam. En este estudio se ha empleado un transductor single-beam, por lo tanto en el diagrama de posición aparece un punto en el centro del ecograma, ya que no es capaz de detectar diferencias de fases y, por lo tanto, posiciones de donde provienen los ecos.

- R (c.g): Centro de gravedad visto desde el transductor. Se calcula como la media de las distancias transductor-eco y se mide en metros.

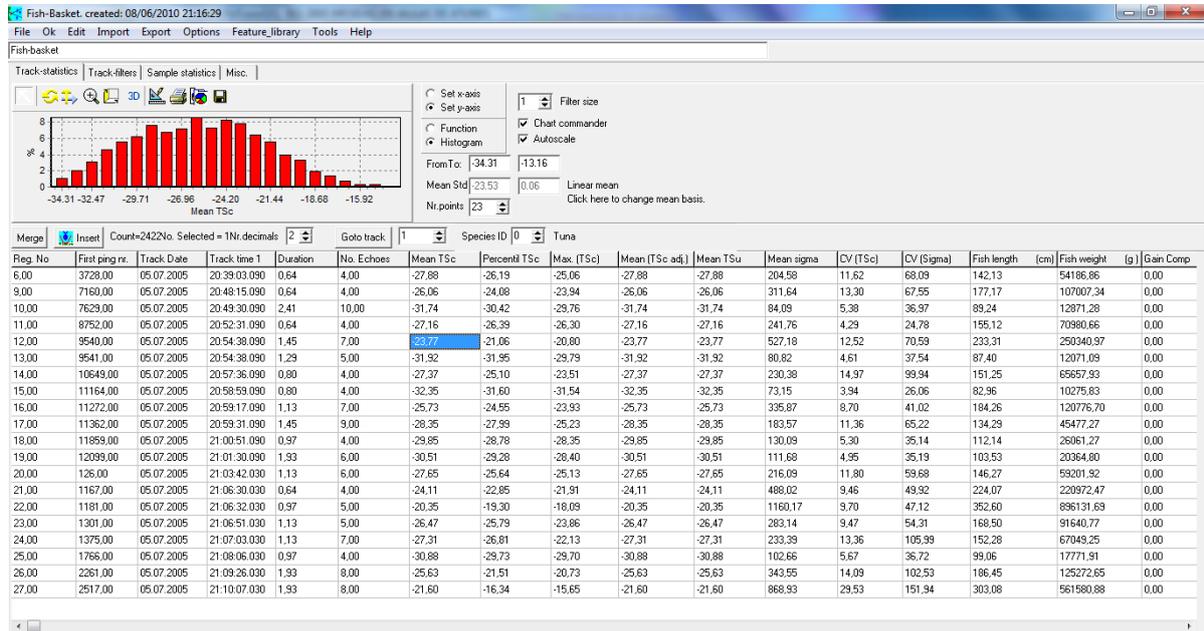


Ilustración 10 Parámetros elegidos en las *fish baskets*

Estos parámetros se exportan y se pueden obtener los valores de las trazas o de los ecos. A partir de estos parámetros se realiza el promedio de los valores de TS medio y TS máximo de las trazas, TS medio de los ecos, análisis de los movimientos verticales y análisis del comportamiento de los atunes durante el periodo de cortejo.

## VI. RESULTADOS

### VI.1. HORAS DE FUNCIONAMIENTO DE LA ECOSONDA

Para el proyecto REPRODOTT se obtuvieron medidas acústicas entre febrero y julio de 2005, pero la ecosonda no estaba en funcionamiento todos los días del mes, ni tampoco todas las horas de un día. Esto es decisivo para poder evaluar el número de detecciones, ya que si durante un mes de medida el número de detecciones es bajo puede ser porque los peces no estaban muy activos y no atravesaban con frecuencia el haz del transductor, o también porque durante ese mes el número de horas de medición era bajo. Por lo tanto se ha de tener en cuenta el número de horas de funcionamiento de la ecosonda en la jaula para poder realizar el análisis y obtener unos resultados coherentes. En la Tabla 7 se muestran las horas de funcionamiento de la ecosonda en cada mes de medida.

Mes	Horas de funcionamiento
Febrero	13:50:25
Marzo	220:47:51
Abril	91:54:59
Junio	145:22:04
Julio	99:07:20

Tabla 7 Horas de funcionamiento de la ecosonda en cada mes

Desafortunadamente casi todos los ficheros obtenidos del mes de abril estaban afectados por ruido. En el mar se pueden producir diferentes tipos de ruido que afectan a sistemas acústicos: ruido electrónico, ruido ambiental, reverberación y auto-ruido, este último causado por el mismo equipo. A pesar de no estar presente en el momento de las medidas se puede intuir que este ruido es causado por los equipos electrónicos de alguna embarcación cercana a la jaula. Este ruido enmascara las señales acústicas e interfiere en la detección de objetos sumergidos. Los ecogramas del mes de abril fueron tratados con filtros de eliminación de ruido pero no se pudieron detectar trazas suficientes ni con la calidad deseada, en algunos de ellos ni siquiera se pudieron detectar trazas. Ha sido imposible obtener información útil de ellos y por ello mismo el análisis se ha realizado sin tener en cuenta las medidas de este mes.

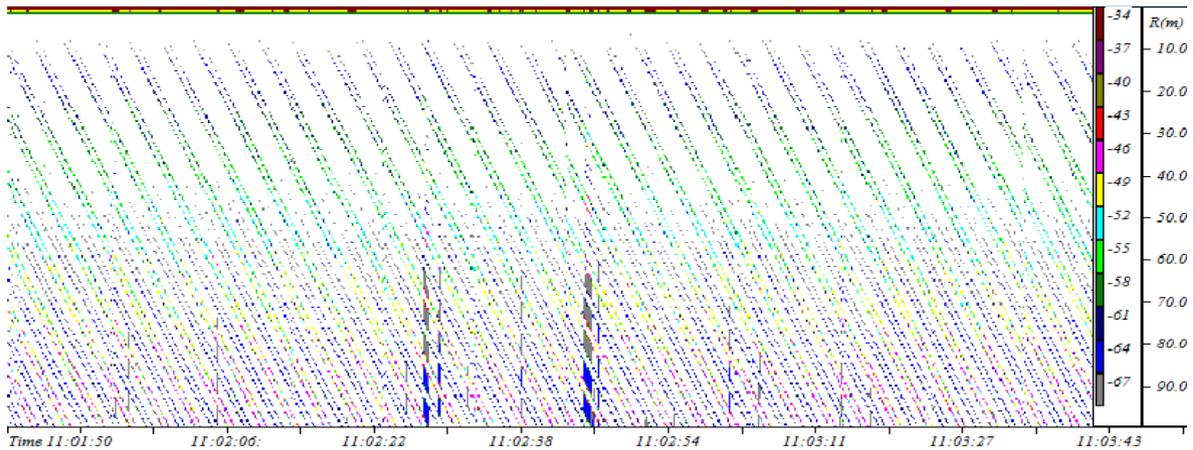
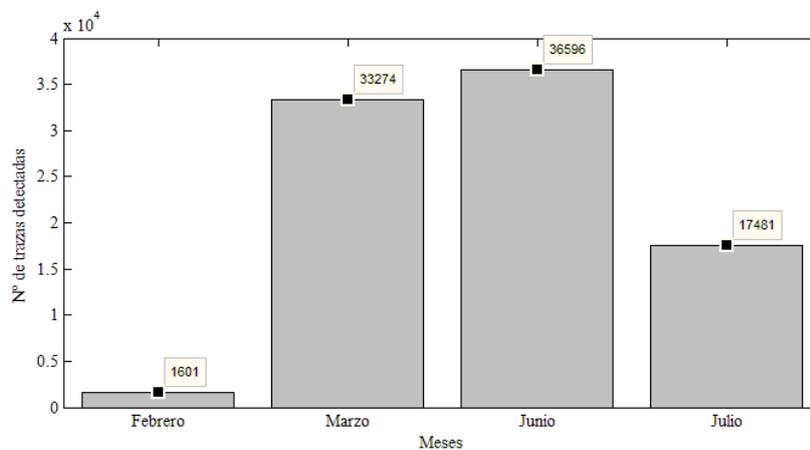


Ilustración 11 Ecograma con ruido del mes de abril

## VI.2. DETECCIONES RECOGIDAS POR LA ECOSONDA

Como se ha comentado anteriormente la aplicación de diferentes valores de umbrales en los ecogramas permiten obtener un número diferente de detecciones. El umbral que se ha tomado como referencia y con el que se han obtenido los posteriores resultados es el 1, teniendo los otros dos umbrales como recursos para poder contrastar los datos obtenidos. Por ello, el histograma que muestra el número de detecciones obtenidas en cada mes de medida con el umbral 1 se muestra en la Gráfica 4.

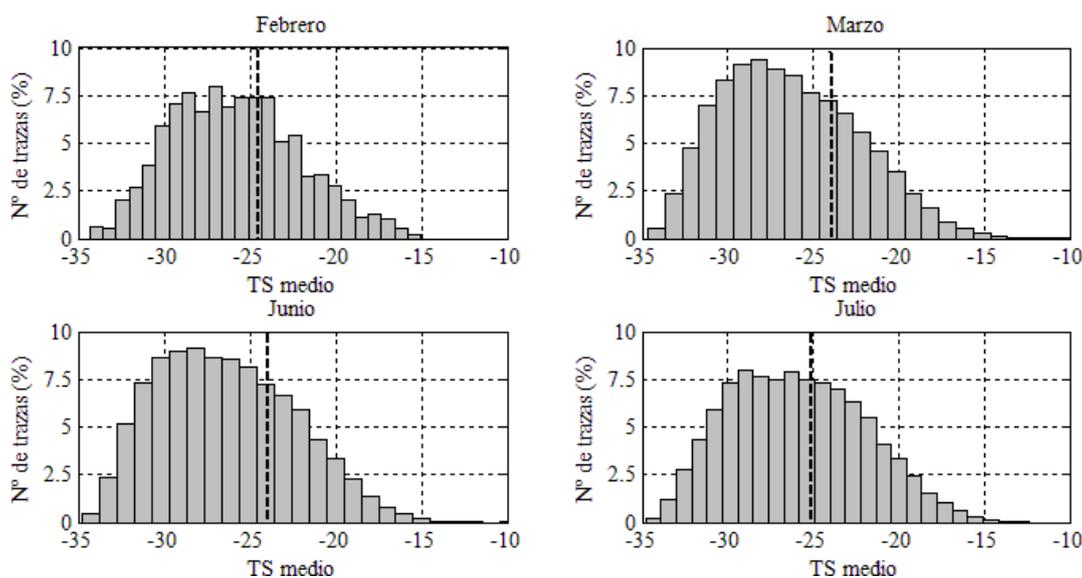


Gráfica 4 Histograma de las detecciones mensuales aplicando el umbral 1

Los datos del mes de abril no han sido representados. Esto se debe a que las medidas realizadas contenían mucho ruido y muy pocas trazas podían ser detectadas correctamente, por ello han sido desechadas para realizar el análisis. Por otra parte, aunque durante el mes de febrero se detectaron pocas trazas ya que el número de horas de medida en este mes es bajo, son suficientes para poder estimar un valor de TS promedio, y como se verá más adelante, no difiere del TS promedio del resto de meses.

### VI.3. TS MEDIO DE LAS TRAZAS

Durante cada mes de medida se obtienen los valores de TS medio de las trazas detectadas. El TS medio de una traza se calcula como el TS promedio de todos los ecos de una traza. En la Gráfica 5 se representa la distribución de valores de TS medio de las trazas registradas.



Gráfica 5 TS medio de las trazas y TS promedio para el umbral 1

La línea punteada señala el promediado de los valores de TS medio de las trazas detectadas con el umbral 1. Se puede observar como todas las distribuciones son unimodales. En la Tabla 8 se muestran los TS promedio obtenidos con los diferentes umbrales aplicados.

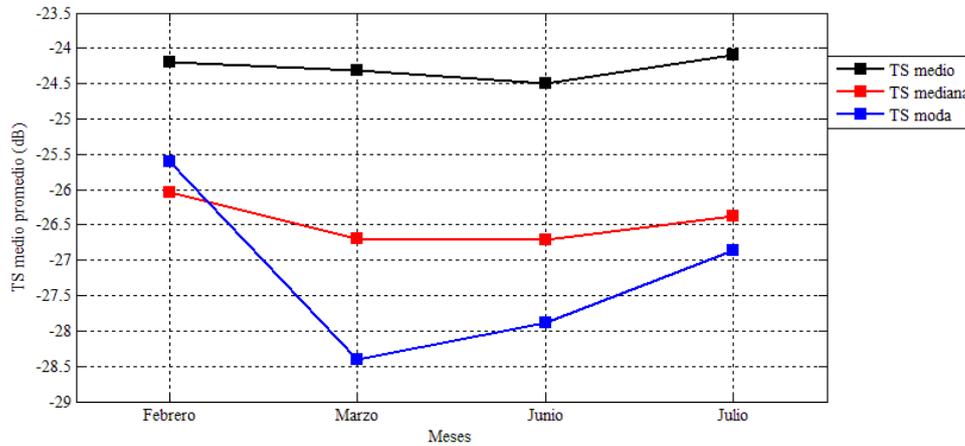
	Febrero	Marzo	Junio	Julio
TS medio Umbral 1 (dB)	-24.19	-24.32	-24.49	-24.09
TS medio Umbral 2 (dB)	-25.13	-25.56	-25.79	-25.19
TS medio Umbral 3 (dB)	-22.32	-22.27	-22.41	-22.26

Tabla 8 TS medio promedio de las trazas para cada umbral

Comparando los valores se observa que, independientemente del número de trazas detectadas en el mes de medida, los valores de TS medio son similares para un mismo umbral. Por otra parte, se puede decir que el valor de TS obtenido no es sensible a variaciones durante el periodo de alimentación. Se podría estimar un valor de TS medio para el Bluefin Tuna con una longitud media de 183 cm entre -24 dB y -25 dB empleando un umbral SED de -40 dB y AMP de -35 dB.

Para conocer con detalle el conjunto de datos con los que se trabaja, no basta con analizar las medidas de tendencia central, sino que necesitamos considerar también la desviación que

representan los datos en su distribución respecto de la media aritmética de dicha distribución, su mediana y su moda. Todo ello con objeto de tener una visión de los mismos más acorde con la realidad a la hora de describirlos e interpretarlos para poder tomar decisiones coherentes. En la Gráfica 6 se representa la evolución del TS medio, mediana y moda de las trazas.



Gráfica 6 Evolución de TS medio promedio, mediana y moda de las trazas para el umbral 1

Todas las desviaciones estándar de TS están alrededor del 20%, lo que revela que las variaciones del TS dorsal del atún a lo largo del periodo de alimentación son insignificantes y que no hay posible correlación con el engorde de los atunes. Sin embargo, la alta dispersión de los valores de TS medidos se corresponde con una dispersión similar de las variables biométricas. Además, se puede observar como el TS medio y el TS mediana siguen un patrón similar, mientras que el TS moda tiene un patrón diferente, es decir, que el pico máximo en la distribución de TS varía según el mes de media sin seguir la tendencia del TS medio.

En la Tabla 9 se muestran los valores obtenidos en dB del análisis estadístico de TS medio de las trazas.

	Recuento	Promedio	Moda	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo
TS medio Febrero	1601	-24,19	-25,60	-24,03	-34,35	-15,02
TS medio Marzo	33274	-24,32	-28,41	-23,44	-34,67	-9,63
TS medio Junio	36596	-24,49	-27,88	-23,86	-34,75	-9,38
TS medio Julio	17481	-24,09	-26,87	-23,70	-34,79	-12,37
Promedio	22238,00	-24,27	-27,05	-23,75	-34,64	-11,06

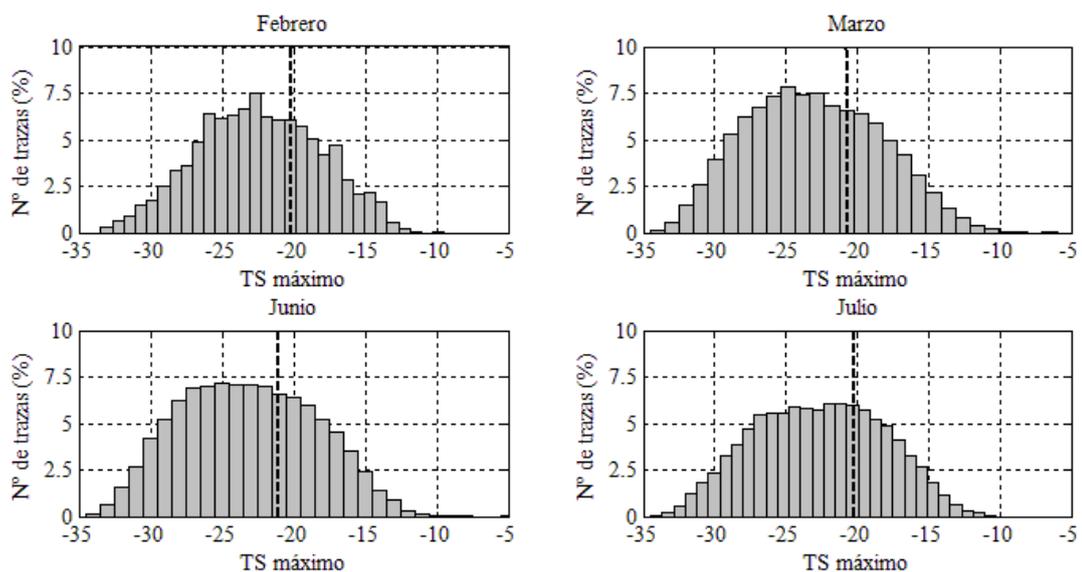
Tabla 9 Valores estadísticos del TS medio de las trazas con el umbral 1

La moda sería el valor más repetido, es decir, el pico dentro de la distribución de valores. Se observa como varía según el mes de medida, teniendo un promedio de -27 dB. Los valores de TS

medio obtenidos ocupan un amplio rango de valores si tenemos en cuenta el mínimo y el máximo valor de TS obtenidos. Esta dispersión se puede deber a diversos factores, por ejemplo, que la intensidad de un eco proveniente del esqueleto del pez o de su vejiga natatoria será mucho más alta que la de un eco proveniente de las aletas o de la cola debido al cambio de impedancias, por lo que si la traza no está perfectamente definida o el pez ha atravesado el haz de manera parcial no se puede conocer la zona del pez insonificada. Por otra parte, se deben tener en cuenta todos los posibles ecos detectados provenientes de los peces para el cálculo de TS, independientemente de su trayectoria por el haz. Además, conocidas las dimensiones de la jaula, de los peces y del haz se piensa que los peces son insonificados casi siempre de manera parcial.

#### VI.4. TS MÁXIMO DE LAS TRAZAS

Dependiendo de la aplicación o del estudio del atún se puede buscar el TS máximo de una especie en lugar del TS medio. Este TS máximo corresponde al eco que tiene mayor intensidad en una traza y mediante él se puede reconocer la zona del pez de donde proviene el eco, dorsal o ventral. Este estudio se ha realizado con medidas dorsales por lo que las zonas de donde vendrán los ecos con mayor intensidad será el esqueleto del atún. A continuación, se representan en la Gráfica 7 los valores de TS máximo de los ecos de las trazas detectadas con el umbral 1. En los histogramas se muestra el TS máximo promedio con una línea punteada.



Gráfica 7 TS máximo de las trazas y valores promedio para el umbral 1

Al igual que en las distribuciones del TS medio, estas también son unimodales, aunque en los meses de junio y julio la curva sea algo más achatada en su zona central.

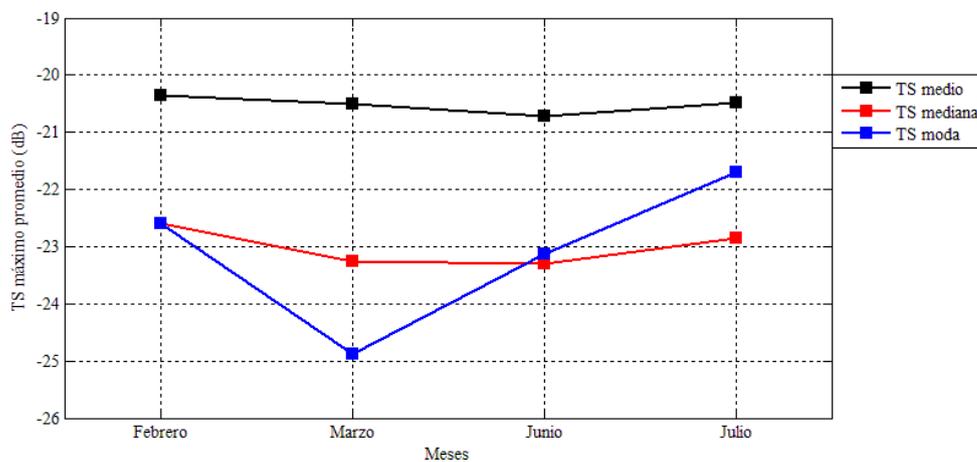
Los valores promedio calculados para cada umbral aplicado se muestran en la Tabla 10.

	Febrero	Marzo	Junio	Julio
TS medio Umbral 1 (dB)	-20.35	-20.50	-20.72	-20.48
TS medio Umbral 2 (dB)	-20.97	-21.42	-21.68	-21.29
TS medio Umbral 3 (dB)	-19.06	-18.96	-19.15	-19.12

Tabla 10 TS máximo promedio de las trazas para cada umbral

Se observa que, al igual que en el caso del TS medio, los valores de TS máximo obtenidos para cada mes son muy similares para un mismo umbral. Se podría estimar un valor de TS máximo para el Bluefin Tuna con una longitud media de 183 cm de -20,5 dB empleando un umbral SED de -40 dB y AMP de -35 dB.

En la Gráfica 8 se representa la evolución del TS máximo de las trazas detectadas junto con el TS mediana y el TS moda.



Gráfica 8 Evolución del TS máximo promedio de las trazas para el umbral 1

Las desviaciones estándar del TS máximo están alrededor del 20%, al igual que el TS medio calculado anteriormente. Por lo tanto, las variaciones del TS máximo dorsal del atún a lo largo del periodo de alimentación son insignificantes y que no hay posible correlación con el engorde de los atunes. Aquí también el TS máximo y el TS mediana siguen un patrón similar, mientras que el TS moda tiene un patrón diferente, marcando irregularidades en la forma de la distribución de TS durante los meses.

En la Tabla 11 se muestran otros parámetros estadísticos basados en el TS máximo de las trazas obtenidas aplicando el umbral 1.

	Recuento	Promedio	Moda	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo
TS máximo Febrero	1601	-20,35	-22,59	-20,03	-33,45	-9,45
TS máximo Marzo	33274	-20,50	-24,89	-19,34	-34,51	-3,96
TS máximo Junio	36596	-2072	-23,14	-19,89	-34,48	-4,47
TS máximo Julio	17481	-20,48	-21,70	-20,08	-34,47	-10,25
Promedio	22238,00	-20,51	-22,93	-19,82	-34,20	-6,17

Tabla 11 Valores estadísticos del TS máximo de las trazas con el umbral 1

Con los valores máximos la moda se sitúa en -23 dB aproximadamente, aumentando en 4 dB el valor promedio. Al igual que en los histogramas del TS medio los valores de TS máximo varían ocupando un rango muy amplio de valores de TS entre el mínimo y el máximo.

#### VI.5. *TS MEDIO DE LOS ECOS*

Para hacer un análisis más exhaustivo a partir de los ecogramas disponibles se estudian los valores de los ecos individuales de las trazas detectadas por la ecosonda. El análisis previo se hizo con el valor de TS medio y máximo de las trazas, pero al realizar el análisis con los ecos individuales se obtiene un promediado de los valores de TS de todos los ecos representados en el ecograma, posterior al filtrado en el que se eliminaban ecos indeseados o ruido y también al obtener únicamente las trazas con determinadas características. Los ecos con los que se ha trabajado son los que forman una traza.

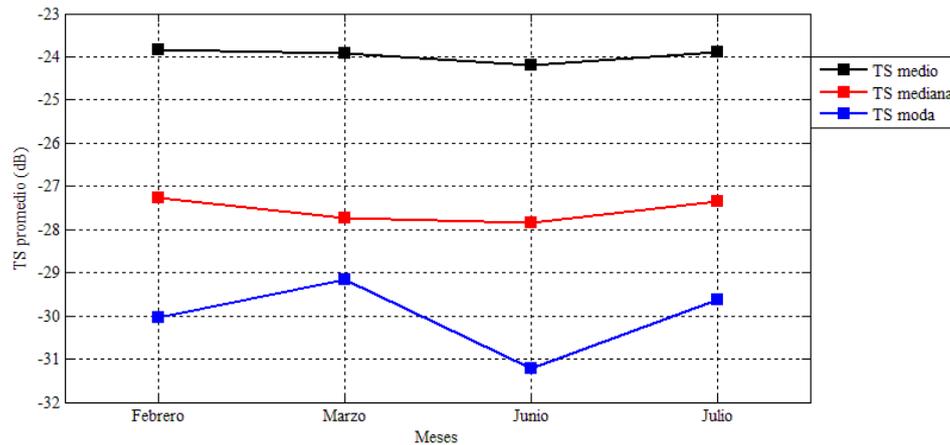
Los valores promedio de los tres umbrales aplicados se muestran en la Tabla 12.

	Febrero	Marzo	Junio	Julio
TS medio Umbral 1 (dB)	-23.85	-23.93	-24.20	-23.90
TS medio Umbral 2 (dB)	-24.86	-25.22	-25.57	-25.10
TS medio Umbral 3 (dB)	-22.00	-21.94	-22.17	-22.05

Tabla 12 TS promedio de los ecos para cada umbral

Los valores de TS medio obtenidos para cada umbral son similares a los valores de TS medio de las trazas.

En la Gráfica 9 se representa el TS medio, TS mediana y TS moda de los ecos en cada mes de medida.



Gráfica 9 Evolución del TS medio, TS mediana y TS moda de los ecos para el umbral 1

Las desviaciones estándar del TS promedio de los ecos están el 21 y el 22%. Los valores de TS medio y TS mediana de los ecos varían según el mes, pero siempre dentro de unos márgenes no muy distanciados y siguiendo una misma tendencia entre ellos. En cambio, los valores de TS moda no siguen esa tendencia, variando significativamente durante los meses de medidas. Se puede comprobar cómo los valores de TS medio son muy cercanos a los valores promedio del TS medio de las trazas visto en el apartado VI.3, aunque su desviación típica es algo mayor, posiblemente porque al hacer el análisis mediante ecos éstos tengan un umbral más amplio que si se analiza mediante trazas. Los valores de TS moda son menores que en el análisis por trazas, esto se debe a que en una misma traza hay más ecos con menor intensidad, por lo tanto al hacer el promediado el resultado será un valor inferior al TS medio de las trazas.

En la Tabla 13 se muestran otros parámetros estadísticos basados en el TS máximo de las trazas obtenidas aplicando el umbral 1.

	Recuento	Promedio	Moda	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo
TS medio Febrero	11984	-23,85	-30,03	-22,11	-34,99	-9,45
TS medio Marzo	253473	-23,93	-29,17	-21,67	-34,99	-3,96
TS medio Junio	274430	-24,20	-31,21	-22,20	-34,99	-4,47
TS medio Julio	128950	-23,90	-29,62	-22,21	-34,99	-10,25
Promedio	167209,25	-23,97	-29,94	-22,04	-34,99	-6,17

Tabla 13 Valores estadísticos del TS medio de los ecos con el umbral 1

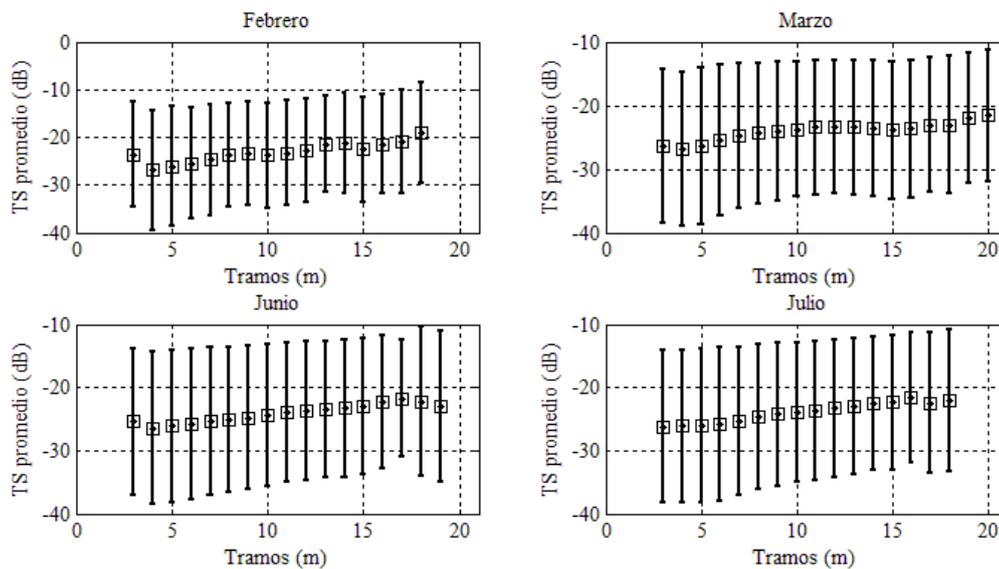
Con los valores medios de los ecos la moda se sitúa en -24 dB aproximadamente. Muy similar al valor obtenido como TS medio de las trazas. Los valores de TS tienen una dispersión muy elevada, en este caso más elevada que los datos obtenidos de TS medio de las trazas. Se puede

comprobar observando el rango de valores de TS entre el mínimo y el máximo. Como se ha comentado anteriormente, esta dispersión es debido a que el pez es insonificado de manera parcial. Si a ello le sumamos que el análisis se realiza con los ecos, es decir, a partir de las muestras de cada traza, es esperado que la dispersión aumente ya que en este caso no se hace promediado entre ecos.

### VI.6. TS VERSUS PROFUNDIDAD

Dado que el tamaño del atún es del orden de las dimensiones del haz del transductor en la mayoría de las distancias en el interior de la jaula, se estudia el TS promedio dividiendo los ecogramas en capas de 1 metro desde la superficie hasta 20 metros de profundidad, donde se encuentra la base de la jaula. El cálculo se ha realizado a partir de los datos obtenidos como ecos, no como trazas. Si este estudio se hubiera realizado con los datos de las trazas no se podrían observar las diferencias de nivel en dB de los ecos pertenecientes a trazas que ocupan más de 1 metro en vertical dentro del ecograma.

Se puede observar en la Gráfica 10 que al aumentar la distancia respecto al transductor el valor de TS promedio se incrementa hasta llegar a una distancia donde parece estabilizarse. En este caso la distancia se encuentra entre 10 y 20 metros.

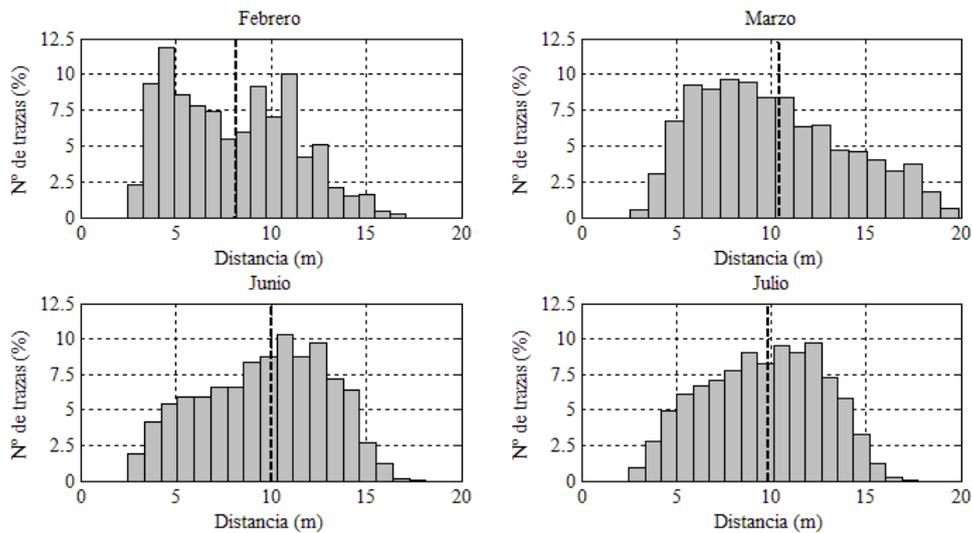


Gráfica 10 TS promedio y desviación estándar versus distancia de los ecos detectados empleando el umbral 1

Se han incluido en la Gráfica 10 las barras de desviación estándar. Se puede observar que son muy grandes, tal y como ocurre con las desviaciones estándar del TS medio y TS máximo. Esta medida de dispersión indica que la media de las distancias que tienen los datos respecto a su media aritmética es muy grande, es decir, los valores de intensidad en dB se encuentran en un intervalo muy grande, teniendo valores muy elevados y otros muy pequeños.

### VI.7. MOVIMIENTOS VERTICALES

Los movimientos verticales de los atunes en el interior de la jaula se pueden estudiar a partir de las ecos registradas por la ecosonda e interpretados como trazas en el ecograma y su posición en el rango vertical. En la Gráfica 11 se obtienen los histogramas de cada mes de medida aplicando el umbral 1.



Gráfica 11 Histograma de las posiciones de las trazas en el interior de la jaula con el umbral 1

A partir de las distribuciones obtenidas se ve claramente como las trazas durante junio y julio se localizan en una zona intermedia similar entre los 8 y 13 metros aproximadamente; excepto en el mes de febrero que el histograma no presenta una distribución unimodal como el resto, y en el mes de marzo, que están posicionados en su mayoría entre los 5 y 9 metros de distancia desde la superficie. Estas variaciones se pueden deber a dos factores: el primero, y aplicable al mes de febrero, es que no hay muchas trazas detectadas durante este mes ya que fueron pocas horas las que la ecosonda estuvo en funcionamiento, por ello la distribución que se observa no es normal; el segundo, debido a ser un mes frío, tanto en febrero como en marzo, los peces suben a la superficie donde la temperatura del agua es mayor.

En la Tabla 13 se muestra el resumen estadístico de las posiciones verticales de las trazas con el fin de analizar el conjunto de trazas registradas.

	Recuento	Promedio	Moda	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo
Rango Febrero	1601	7,98	4,80	3,19	2,50	17,04
Rango Marzo	33274	10,07	7,70	3,86	2,53	19,90
Rango Junio	36596	9,66	11,00	3,28	2,50	18,13
Rango Julio	17481	9,55	11,30	3,09	2,50	17,73
Promedio	22238,00	9,32	8,70	3,35	2,51	18,20

Tabla 14 Resumen estadístico de las posiciones verticales de los atunes en metros

Al observar la desviación estándar y los valores de distancia mínima y la máxima se puede decir que los atunes se mueven en todo el espacio disponible de la jaula. De hecho, cuando viven en libertad nadan en mayores profundidades. Por otra parte, se tiene en cuenta que los peces se mueven en un espacio similar en el interior de la jaula como se puede observar en los histogramas anteriores. Las máximas frecuencias en junio y en julio son muy parecidas, en torno a 11 metros, pero en febrero y en marzo son diferentes, lo que indicaría que la época del año (y por tanto el ángulo de incidencia de la luz solar) marca claramente el promedio de profundidad de los atunes.

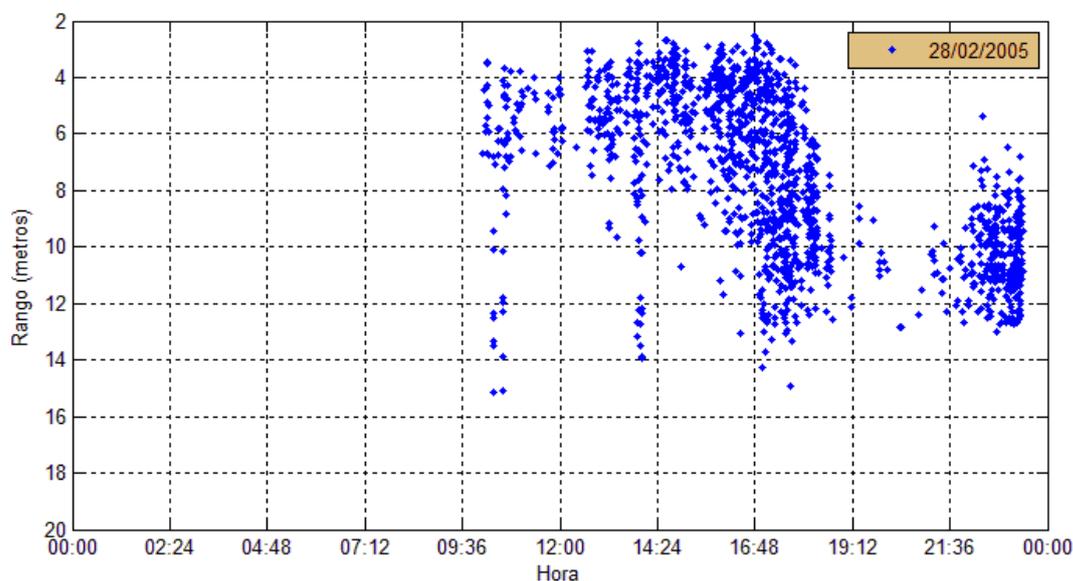
Previamente al análisis se ha de tener en cuenta algunos factores. En el siguiente listado se describen los ejemplos más importantes.

- Se ha de tener en cuenta que el tiempo que estuvo la ecosonda en funcionamiento y registrando trazas, ya que a mayor tiempo mayor número de trazas se habrán podido registrar. Se pueden comparar los meses de febrero y marzo, pues en el primero el número de horas de la ecosonda en funcionamiento es muy bajo y en marzo es bastante elevado.
- Por otro lado, las trazas que se representan son el resultado de un filtrado en el que se eliminaban trazas no deseadas, éstas son las que no cumplían las características descritas en el apartado V.3. Además, según el umbral que se haya aplicado en los ecogramas se obtendrán más o menos trazas. En los resultados expuestos se ha aplicado el umbral 1.
- También se debe tener en cuenta que en algunos días de medida había marejada, lo que implica un movimiento de la jaula. Esto puede influir en la posición media de los atunes ya que si se levanta la jaula los peces, involuntariamente, también lo harían y las trazas aparecerán en el ecograma en una posición superior. Por otro lado si la marejada ha provocado señales de ruido en el sistema tampoco se representan ya que como se ha comentado anteriormente las trazas debían superar unos requisitos de calidad para ser válidas.

- El monitoreo de la ecosonda no ha funcionado 24 horas seguidas en todo el proceso de medidas, siempre había una o dos horas en las que se paraba el sistema. Por lo tanto no se sabe cuál es el movimiento de los peces a esas horas. De todos modos, se han representado los datos de los días de mayor número de horas de medida.
- Es importante y a tener en cuenta que a los peces se les daba de comer una vez al día, sobre las 10:00 de la mañana. Se debería observar cómo los peces se dirigen hacia la superficie, pero la ecosonda sólo ocupa una porción de la jaula, por lo que si el alimento no es dado en esa zona definida el movimiento y la posición del pez no se representaría en el ecograma y no se vería el efecto.

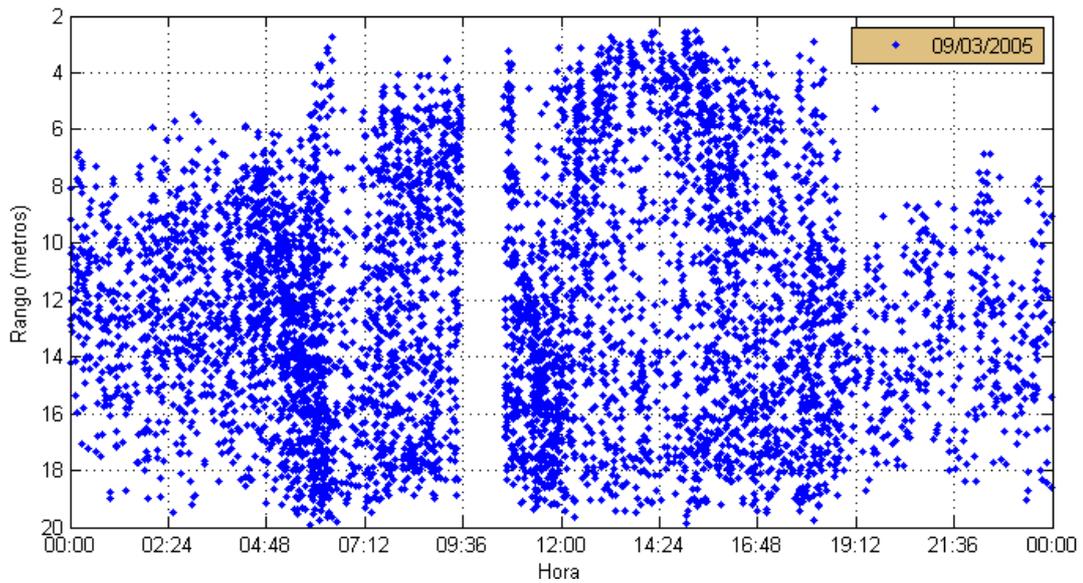
Tras estas aclaraciones se obtienen gráficas donde se muestran las posiciones de los atunes a lo largo de un día de medida en casa mes. Se representan los días en los que la ecosonda ha estado en funcionamiento y recogiendo datos 24 horas seguidas, o casi sin interrupción.

- Febrero: Como se puede observar en la Gráfica 12 no hay muchas muestras de este mes de medida, pero con los datos obtenidos del día 28 de febrero se puede decir que sus posiciones varían según la hora del día. De 10:00 a 16:30 se localizan los peces entre 3 y 16 metros desde la superficie. A partir de esta hora los peces descienden situándose entre 7 y 13 metros hasta las 23:00.



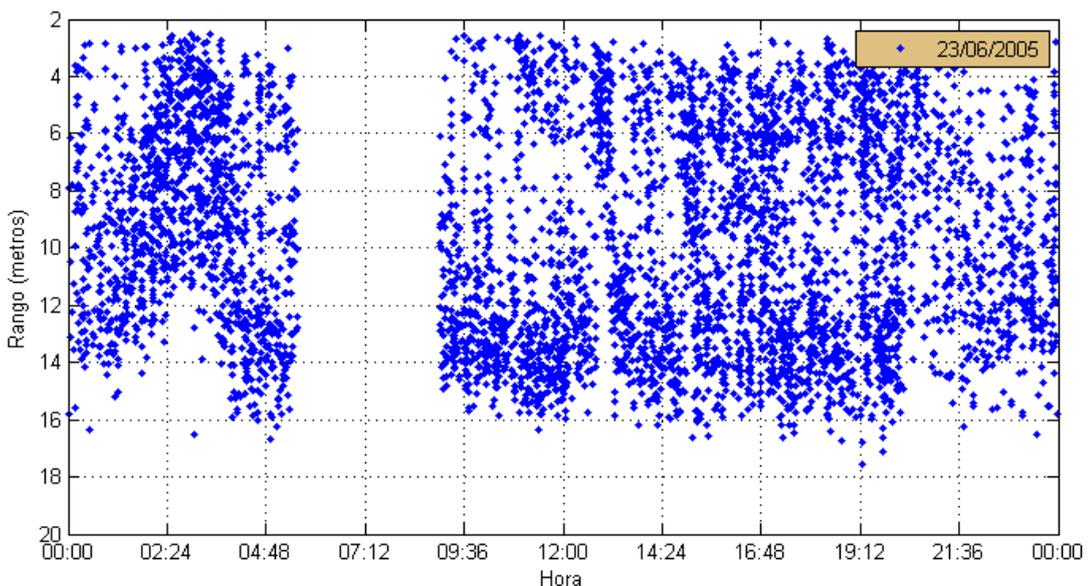
Gráfica 12 Posición de las trazas en Febrero

- Marzo: Se observa en la Gráfica 13 que durante este mes hay gran cantidad de trazas en los ecogramas. En el ecograma obtenido del día 9 de marzo los peces se mueven en prácticamente todo el rango del que disponen, es decir, en los 20 metros de longitud que tiene la jaula. Se observa que los peces están situados más cerca de la superficie durante las horas de luz, esto es entre las 6:00 y las 19:00 horas.



Gráfica 13 Posición de las trazas en Marzo

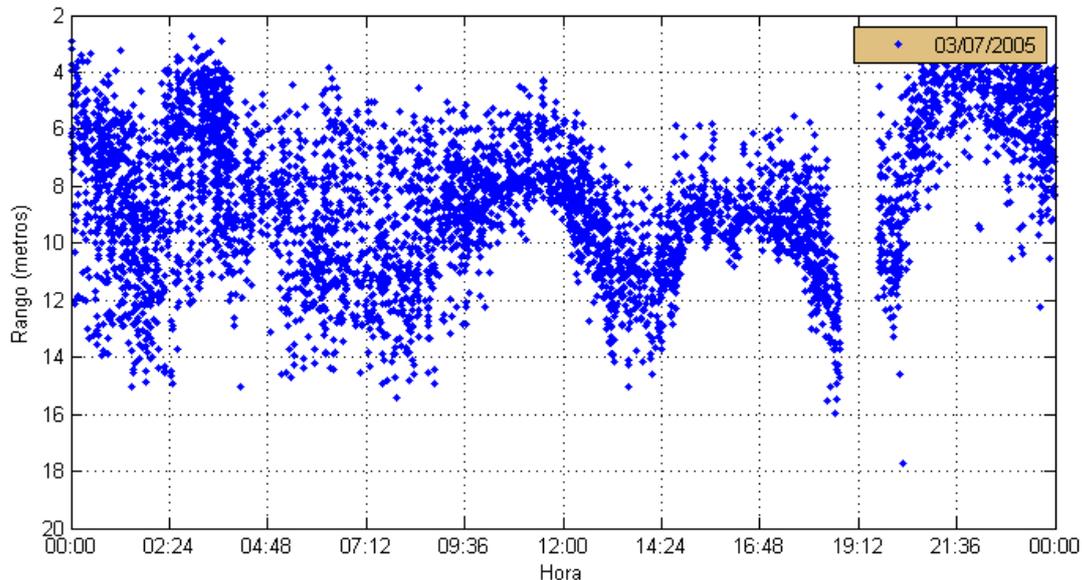
• **Junio:** Como se puede observar en la Gráfica 14, durante el mes de junio las trazas se localizan entre 2 y 16 metros de profundidad. Del ecograma obtenido el día 23 de junio se observa gran cantidad de trazas detectadas durante todas las horas de medida, excepto entre las 5:00 y 9:00, que es cuando la ecosonda dejó de estar en funcionamiento. Se localizan mayores cantidades de trazas entre las 2:00 y 4:00 entre 3 y 11 metros; y entre las 9:00 y 19:30 entre 12 y 16 metros de profundidad.



Gráfica 14 Posición de las trazas en Junio

• **Julio:** Se observa en la Gráfica 15 que en este mes las trazas se localizan en la zona media de la jaula, entre 4 y 14 metros de profundidad. Del día 3 de julio se observan las densidades

de trazas bien definidas en un rango determinado según la franja horaria. Las mayores densidades de trazas se encuentran durante la noche, entre las 00:00 y las 2:30, entre 4 y 10 metros; y entre las 20:30 y las 00:00 entre 4 y 7 metros de profundidad. En el intervalo de horas entre las 9:00 y las 19:00 las trazas suben y bajan en el interior de la jaula formando en el gráfico una forma de “M”, teniendo la mínima posición entre las 13:00 y 14:00 horas.



Gráfica 15 Posición de las trazas en Julio

A partir de los datos obtenidos en los ecogramas se observa que durante los días de medida del mes de marzo gran cantidad de peces atravesaron el haz de la ecosonda, teniendo posiciones en el rango diferentes según el día. Esto puede deberse a causas externas y no relacionadas con el comportamiento de los atunes, pues como se puede comprobar con los datos durante los meses de junio y julio, la posición de los peces es similar, permaneciendo en un intervalo de espacio muy parecido y más reducido respecto a marzo. La causa principal podría deberse a movimientos de la jaula donde están los peces o a algún posible barco cercano que moleste a los atunes y permanezcan más alejados del haz de la ecosonda.

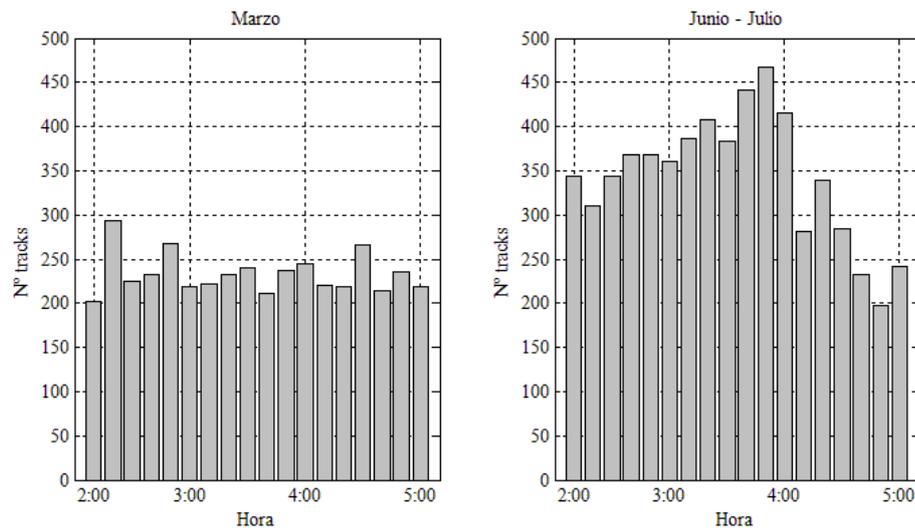
Un aspecto a analizar es el tiempo en el que los peces se mantienen cerca de la superficie o en el fondo. Esto hecho se puede observar mejor en el mes de julio, donde se ve que el cardumen está localizado en una zona determinada según la hora del día y que se repite, en mayor o menor medida para los días observados. Aún así no hay posibilidad de crear un patrón de comportamiento característico de los movimientos verticales de los atunes dentro de la jaula para estos meses de medida.

### VI.8. MONITOREADO DEL PERIODO DE CORTEJO

Una de las cuestiones abiertas en el proyecto REPRODOTT fue constatar si el atún en cautividad había realizado actividades de cortejo o reproducción en el interior de la jaula. Se sabe que el atún realiza dichas actividades entre finales de junio y principios de julio, en zonas cercanas a la superficie y entre las 2:00 y las 5:00 de la mañana. Durante el cortejo el atún macho (sólo 2 o 3 de ellos) persiguen a las hembras a gran velocidad, y parece ser que el hecho de que un grupo reducido inicie la reproducción induce al resto a hacer lo mismo. Por lo tanto se debería observar un cambio en los ecogramas que indique es la reproducción se ha realizado durante este periodo y otro, por ejemplo el del mes de marzo.

En este estudio se ha tratado de detectar este comportamiento mediante el análisis del número de trazas en función de la posición, la frecuencia de detección de trazas y mediante datos estadísticos de la duración de las trazas en términos de número de pings por traza. El número de trazas obtenido para el mes de marzo es de 4198, y para el periodo de cortejo de junio-julio de 6173.

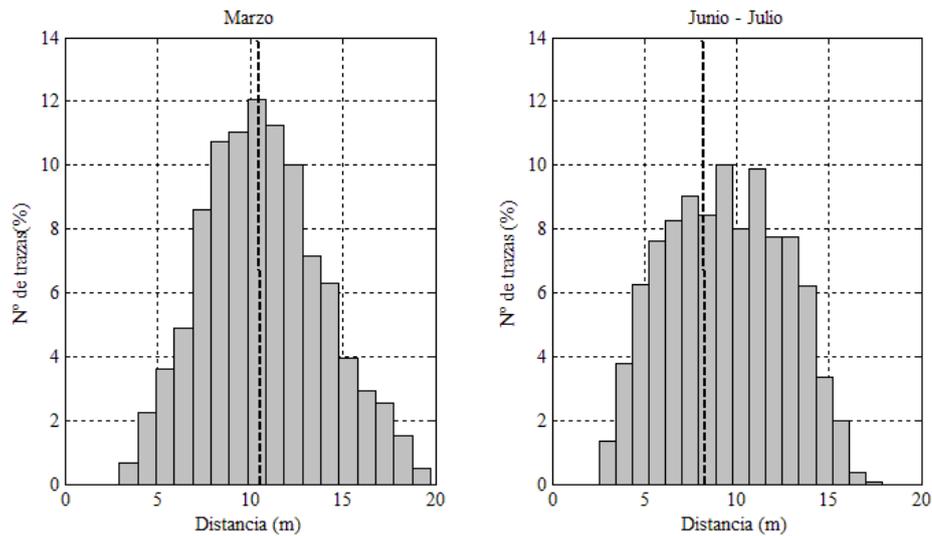
En la Gráfica 16 se muestra un indicador del incremento de actividad del atún. Se compara la actividad a partir de los datos obtenido del periodo de cortejo (última semana de junio y primera de julio) y el mes de marzo como referencia. Se obtienen los datos del número de trazas que han atravesado el haz del transductor durante las 3 horas que aproximadamente dura la actividad del cortejo en intervalos de 10 minutos. Se puede observar como aumenta la actividad en junio-julio con respecto a marzo, alcanzando su máximo alrededor de las 3:50 de la mañana.



Gráfica 16 N° de trazas versus hora durante el periodo de cortejo

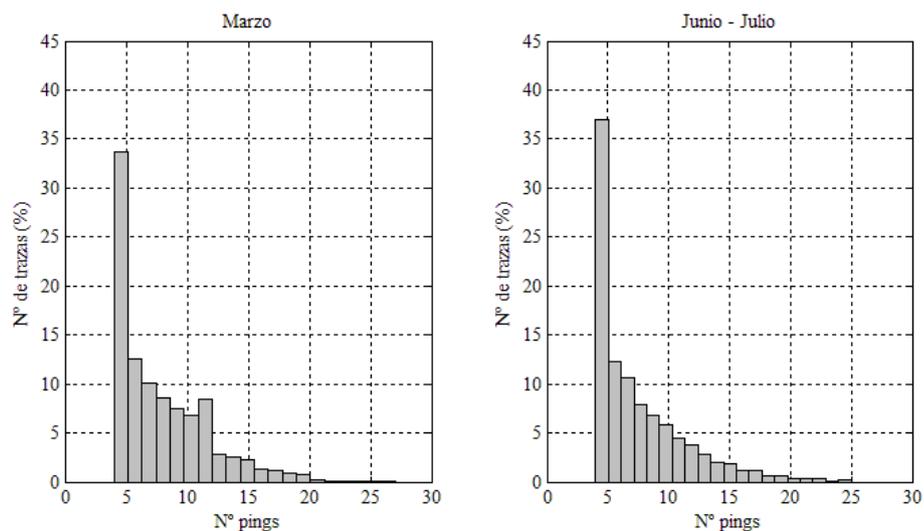
La Gráfica 17 muestra la posición de las trazas en rango durante el periodo de cortejo para el mismo periodo de tiempo anterior. La forma del histograma es muy diferente entre uno y otro, siendo la posición media en junio-julio de 9.3 metros, es decir, más cercana a la superficie, pero con una distribución más uniforme en la zona central de la jaula, sin ocupar apenas la parte inferior

de la jaula. El número de trazas recogidas en los 6 primeros metros son 292 en marzo y 1087 en junio-julio, es decir, en marzo hay un 73% menos que en junio-julio. Lo que indica que durante el periodo de cortejo un mayor número de atunes han sido localizados cercanos a la superficie.



Gráfica 17 Porcentaje del nº de trazas versus distancia al transductor entre las 2:00 y las 5:00 horas

Se ha realizado el análisis a partir de los datos estadísticos obtenidos de la duración de las trazas en términos de pings o ecos, de este modo se puede proporcionar una medida indirecta de la velocidad del paso a través de la haz del transductor. Ya que cuanto más corta son las trazas se puede intuir que a mayor velocidad atravesó el atún el haz del transductor. Se ha de tener en cuenta que la ecosonda empleada en este estudio es de haz simple (single beam) y no puede registrar la posición angular en el haz y reproducir la trayectoria de los peces (como hace la split-beam), por lo tanto, ésta podría ser una manera intuitiva de medir de la velocidad. En la Gráfica 18 se muestra el número de pings que tienen las trazas analizadas. Un aumento de trazas compuestas de pocos pings en el “periodo de cortejo” podría ser también un buen indicador.



Gráfica 18 N° de trazas versus n° de pings durante entre las 2:00 y las 5:00 horas

Estos tres indicadores: el número de trazas, la posición de las trazas y el número de pings de cada traza, sugieren fuertemente que los atunes realizaron actividades de cortejo en el interior de la jaula en el período de esperado.

## VII. CONCLUSIONES

### VII.1. CONCLUSIONES

Se ha obtenido un gran número de medidas dorsales de trazas del Bluefin Tuna o Atún Rojo en jaulas donde se alimentan a los atunes y son monitoreados mediante una ecosonda científica a 38 KHz de haz simple. Los datos muestran distribuciones unimodales para el TS del Bluefin Tuna, con un TS máximo promedio de cada traza alrededor de -20,5 dB para atunes de 183 cm (Fork Length medio).

El TS medio, evaluado a partir de ecos simples o de trazas, se mantiene prácticamente constante durante el período de alimentación, sin reflejar ningún posible engorde de los atunes.

A pesar del tamaño de los animales y el posible error cometido debido a la distancia de campo cercano de los atunes, el TS es bastante constante, y por lo tanto no altera el resultado si la distancia desde el blanco al transductor es de 10 a 20 metros.

El análisis de la posición, de la frecuencia y del número de pings de las trazas durante la madrugada de los últimos días del mes de junio y principios de julio, reveló que los atunes pudieron mantener actividades de cortejo y reproductivas en el interior de la jaula.

### VII.2. LÍNEAS FUTURAS

Como se mencionó anteriormente en este documento, el tipo de transductor utilizado es de haz simple (single beam). Para este tipo de transductores la ubicación del blanco es desconocida en medidas individuales. Como solución o corrección se puede aplicar métodos indirectos para estimar el TS que pertenece a un blanco a través de la eliminación de la influencia del patrón de radiación del transductor utilizado y análisis estadístico de los valores obtenidos (utilizando el algoritmo de Craig-Forbes). Para verificar este método y como un método alternativo también se puede aplicar el método de deconvolución con la función de densidad de probabilidad (PDF) para observar las posibles correlaciones con los datos.

Otra opción sería utilizar un transductor de haz dividido (split-beam) para detectar diferencias de fase entre las señales recibidas. Estas diferencias de fase definen la dirección del blanco y el TS se estima a partir de la sensibilidad del transductor en ese ángulo.

Es deseable que los tiempos de cada medida sean los mismos, de esta forma se pueden comparar las distribuciones de los diferentes meses y correlacionar los datos de forma precisa. También es preferible contar con el mayor número posible de especímenes en la jaula o asegurarse que los peces atravesarán el haz del transductor, aunque esta limitación probablemente venga impuesta por el proyecto que involucra el análisis.

La frecuencia de operación utilizada es correcta porque las dimensiones del atún son muy grandes, pero sería recomendable realizar el mismo experimento con otra frecuencia, por ejemplo a 200 KHz. Las trazas obtenidas estarían mucho mejor definidas y, probablemente, sería más fácil

distinguir los ecos de los peces a los ecos de otras áreas como pueden ser ecos provenientes de la jaula, lo que corresponde con ecos no deseados.

Se propone extender este estudio a las mediciones ventrales incluyendo un sistema de video basado en recoger correlacionados datos biométricos. De esta forma correlacionar los datos obtenidos en este trabajo y obtener un valor de TS útil para diferentes situaciones de monitorización.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la delegación de Murcia del Instituto Español de Oceanografía representado por Fernando de la Gándara y al centro de Islas Baleares representado por Magdalena Iglesias y Joan Miquel.

A Helge Balk, profesor de la Universidad de Oslo y creador del software Sonar5\_Pro.

A mis compañeros de máster y amigos.

A mi familia por su apoyo incondicional.

Gracias a todos por vuestra ayuda y colaboración.

## REFERENCIAS

- [1] A. Belmonte, F. de la Gándara. *El cultivo del atún rojo (Thunnus thynnus)*. Fundación observatorio español de acuicultura, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid (2008).
- [2] D. N. MacLennan, E. J. Simmonds, *Fisheries Acoustics*. London: Chapman & Hall (1992).
- [3] E. Ona, *Methodology for Target Strength Measurements*, ICES Cooperative Research Report 235 (1999).
- [4] F. de la Gándara, J. Miquel, M. Iglesias, A. Belmonte, E. Ayora, A. García-Gómez, *Using Echosounder system to study the vertical movements of captive bluefin tuna (Thunnus thynnus) in floating cages*, European Aquaculture Society Special Publication 35:171-172.
- [5] H. Balk, *Development of hydroacoustic methods for fish detection in shallow water*, Thesis for the degree of Dr. Sci. Faculty of mathematics and natural sciences. University of Oslo ISSN1501-7710 Nr. 137. Norway (2001).
- [6] H. Balk, T. Lindem, *Sonar4 and Sonar5\_Pro Post processing systems, Operator manual v. 5.9.8*, University of Oslo, Norway (2008).
- [7] Kongsberg. *Instruction Manual. Simrad EY500, portable scientific echo sounder*, (1995)
- [8] J. Burczynski, *Introducción al uso de sistemas sonar para la estimación de la biomasa de peces*, FAO, Documentos Técnicos de Pesca 191 (1982).
- [9] Kenneth G. Foote, *Summary of methods for determining fish target strength at ultrasonic frequencies*, ICES J. mar. Sci., 48:211-217 (1991).
- [10] L. G. Rudstam, S. Hansson, T. Lindem, D. W. Einhouse, *Comparison of target strength distributions and fish densities obtained with split and single beam echo sounders*, Fisheries Research 42, 207-214 (1999).
- [11] Laurence E. Kinsler, *et al. Fundamentos de acústica*. Editorial Limusa, 1995.
- [12] M. E. Nucci, C. Costa, M. Scardi, S. Cataudella, *Preliminary observations on bluefin tuna (Thunnus thynnus, Linnaeus 1758) behaviour in captivity*, Journal of Applied Ichthyology, 26, 95-98 (2010)
- [13] M. Moszyński, *Statistical analysis for digital processing of pelagic fish echoes*. Politechnika Gdańska, monografie 66 (2005).
- [14] R.H. Love, *Measurements of fish target strength: A review*, Fishery Bulletin 69.4 (1971).
- [15] V. Espinosa, J. Ramis, J. Alba, *Evaluación de la sonda ultrasónica EY-500 de Simrad para el control de explotaciones de dorada Sparus auratus Linnaeus, 1758*, Boletín: Instituto Español de Oceanografía, 18 (1-4) (2002).

## ANEXOS

## ANEXO 1: DATOS MORFOLÓGICOS DE LOS ATUNES

M/F	Peso (kg)	CFL (cm)	FL (cm)	LD1 (cm)	HP (cm)
M	101	184	176	54	61
M	204	228	218	60	73
M	99	178	170	53	51
F	130	200	191	55	60
M	165	212	202	59	69
F	112	194	185	55	61
M	123	189	180	54	67
F	102	187	179	54	60
M	112	185	177	51	65
M	103	190	181	55	60
F	112	194	185	54	64
F	72	165	158	48	53
M	125	193	184	53	66
M	125	193	184	56	66
M	147	208	199	60	69
F	122	195	186	57	63
F	89	176	168	51	55
F	89	180	172	52	56
M	180	212	202	61	72
F	87	173	165	51	56
M	122	204	195	53	61
M	92	179	171	52	58
F	103	183	175	49	59
F	100	180	172	51	60
F	76	174	166	51	55
F	122	202	193	58	65
M	98	181	173	52	62
M	121	190	181	53	67
F	120	186	178	54	67
M	158	202	193	57	72
F	105	175	167	51	59
M	131	195	186	54	70
M	167	216	206	61	71
F	108	185	177	54	64
F	106	185	177	54	65
M	138	203	194	59	67
M	117	185	177	54	68
M	128	196	187	67	67
M	146	204	195	60	69
M	136	198	189	57	66

Tabla 15 Datos morfológicos de los atunes proporcionada por el Instituto Español de Oceanografía

## ANEXO 2: ESPECIFICACIONES DE LA ECOSONDA SIMRAD EY500

La ecosonda científica SIMRAD EY500 está diseñada para la estimación de biomasa gracias a la portabilidad y el bajo consumo del equipo. El sistema consiste básicamente en la fuente de energía, el transductor, el transmisor-receptor EY500, un ordenador y una impresora a color que permite representar los ecogramas [7].

Las aplicaciones típicas para la EY500 son:

- Evaluación de poblaciones de peces en lagos, ríos y aguas poco profundas.
- Estudios de comportamiento de peces (mediante una ecosonda split-beam se puede hacer tracking y conteo de peces individuales).
- Monitoreado de la biomasa mediante boyas.
- Monitoreado de la contaminación.
- Aplicaciones de observación en sistemas de vigilancia marina.

Los datos recogidos por la ecosonda son procesados directamente y representados en forma de ecogramas a color y tablas mostrando la densidad de peces hasta un máximo de 10 capas de profundidad. El ecograma se puede visualizar en la pantalla del PC o imprimir. Los archivos generados se guardan en el disco duro del sistema y almacenan los datos seleccionados por el usuario para utilizarlos en un posterior análisis con un programa de postprocesado. El equipo permite también la conexión mediante un puerto serie de un sistema de navegación, de esta forma los datos de posicionamiento se guardan junto con los datos de los ecogramas. La ecosonda EY500 permite el control remoto del sistema enviando información a través del puerto serie, este método es útil para el monitoreado de datos acústicos.

El sistema EY500 incluye un potente sistema de procesado que incluye la detección de fondos, integración de ecos y algoritmos para la obtención del target strength. El receptor está diseñado para permitir un rango dinámico de 160 dB. Al mismo tiempo la medida de amplitud tiene una precisión muy alta que, combinado con un bajo auto-ruido, asegura la correcta medición de todos los objetos a detectar.

La ecosonda EY500 está compuesta por:

- Transductor
- Transceptor
- PC
- Fuente de alimentación
- Impresora a color (opcional)
- Sistema de navegación
- Multiplexador
- Módem para aplicaciones con control remoto

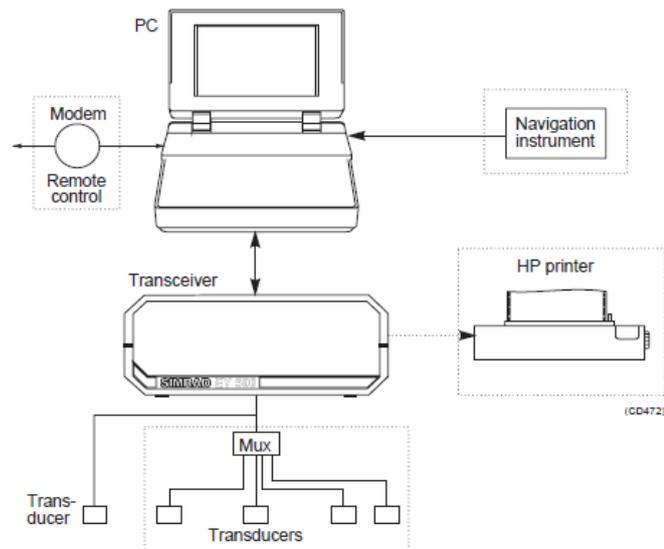


Figura 5 Diagrama de bloques de la ecosonda EY500

Se pueden emplear diversos transductores de haz simple (single beam) a diferentes frecuencias. Además, se pueden utilizar transductores de haz dividido (split-beam) a 38, 70 y 120 KHz para las medidas de target strength.

El transceptor EY500 está formado por cuatro placas de circuitería:

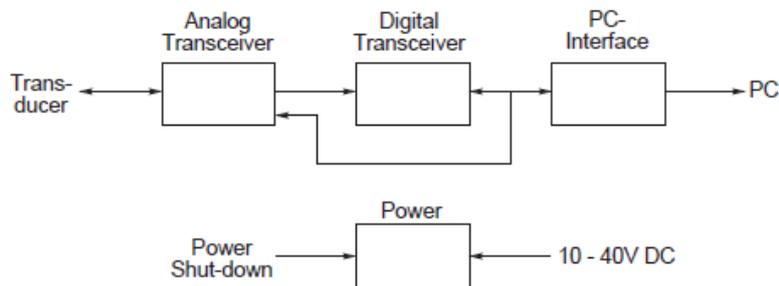


Figura 6 Diagrama de bloques simplificada del transceptor EY500

- Un módulo transceptor analógico que contiene el transmisor y los receptores.
- Un transceptor digital que realiza conversiones A/D y medidas de la fase eléctrica (se aplica únicamente en operaciones con split-beam).
- Un módulo de interfaz mediante el PC.
- Una unidad de alimentación.

Las especificaciones técnicas comunes para single beam y split-beam:

<i>Parámetros</i>	<i>Valor</i>
Frecuencias	38, 70, 120, 200 y 710 KHz
Potencia	De 50 a 250 W
Rango	1, 5, 10, 25, 50, 100, 150, 250, 500, 1000, 1500 y 2500 m
Phasing	De 0 a 2500 m en incrementos de 1m
Display	Ecograma en 12 colores (3 dB por color). Escala de color relacionada con el verdadero volumen backscattering o el target strength
Capas	Hasta 10 desde la superficie hasta el fondo
Integrador	Prácticamente ilimitado rango dinámico. Integración independiente dentro de cada capa
Almacenamiento de datos	Selección de datos en la EY50 y ecogramas almacenador en el disco duro en tiempo real
Intervalos de cálculo	Ping, tiempo o velocidad simulada
Función de repetición	Para almacenamiento y repetición de muestras

Tabla 16 Especificaciones técnicas para single beam y split-beam

Las especificaciones técnicas válidas para split-beam:

<i>Parámetros</i>	<i>Valor</i>
Analizador de target strength	24 clases de TS (1.5 dB por clase) hasta 10 capas Posición del blanco en el haz Compensación de lóbulos en el valor de TS Información angular de la muestra y de la traza
Almacenamiento de datos	Distribución de TS en las capas preseleccionadas

Tabla 17 Especificaciones técnicas para split-beam

Otras especificaciones técnicas:

<i>Parámetros</i>	<i>Valor</i>
Requerimientos mínimos del PC	386 AT, 8 Mbyte RAM, 80 Mbyte de disco duro, co-procesado numérico, puerto serie para sistema de navegación o control remoto. Puerto de impresora para el transceptor EY500
Alimentación del sistema	Voltaje DC: 10-40 VDC Voltaje AC: 110-220 VAC (via adaptador AC/DC)

Tabla 18 Especificaciones opcionales

Especificaciones técnicas del transceptor:

<i>Parámetros</i>	<i>Valor</i>
Suministro de energía	De 10 a 40 VDC
Consumo de energía	Aprox. 15 W
Temperatura de trabajo	De 0 a 55°

Tabla 19 Especificaciones del transceptor

Parámetros del transceptor:

<i>Frecuencia (Hz)</i>	<i>Tipo de haz</i>	<i>Potencia (W)</i>	<i>Duración del pulso (ms)</i>			<i>Ancho de banda (KHz)</i>		<i>Resolución (cm)</i>
						<i>Estrecho</i>	<i>Ancho</i>	
37.878	Single	250	0.3	1.0	3.0	0.38	3.8	10
70.422	“	50	0.2	0.6	2.0	0.7	7.0	5
119.047	“	60	0.1	0.3	1.0	1.2	12.0	3
200.000	“	60	0.06	0.2	0.6	2.0	20.0	2
714.286	“	50	0.06	0.2	0.6	7.1	71.4	2
37.878	Split	250	0.3	1.0	3.0	0.38	3.8	10
70.422	“	50	0.2	0.6	2.0	0.7	7.0	5
119.047	“	60	0.1	0.3	1.0	1.2	12.0	3

Tabla 20 Especificaciones del transceptor

### ANEXO 3: DORSAL TS MEASUREMENT ANALYSIS AND TUNA BEHAVIOR IN SEA CAGES

## Dorsal TS measurement analysis and tuna behavior in sea cages

Sara Sainz-Pardo<sup>1</sup>, Víctor Espinosa<sup>1</sup>, Fernando de la Gándara<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras (IGIC), Universidad Politécnica de Valencia, C/ Paranimf, 1, 46730 Grau de Gandia (Valencia – Spain) [sasaimar](mailto:sasaimar@upv.es), [vespinos@upv.es](mailto:vespinos@upv.es)

<sup>2</sup> Instituto Español de Oceanografía (IEO), Planta de Cultivos Marinos. Carretera de la Azohía s/n. 30860- Puerto de Mazarrón (Murcia - Spain), [fernando.delagandara@mu.ieo.es](mailto:fernando.delagandara@mu.ieo.es)

The aim of this paper is a better understanding of tuna behavior in captivity and the feasibility of the feeding process monitoring using non-invasive techniques. We analyze the acoustical recordings obtained with the Simrad EY500 single beam echosounder at 38 kHz, with dorsal measurements of captive Bluefin Tuna (*Thunnus thynnus*) kept in feeding cages from February to July 2005. The measurements were taken by the IEO (Spanish Institute of Oceanography) in the frame of the REPRODOTT (Reproduction and Domestication of *Thunnus thynnus*) European project, to monitor the behavior of forty specimens, placed in a sea cage (25 meters of diameter and 20 meters of high). The echosounder was placed down-looking on the sea surface in the center of the cage. From the echograms, we studied the tuna behavior (rate and average speed of passage through the transducer beam, vertical movements, etc), and the evolution of the average of dorsal target-strength (TS) during the six months feeding period at the selected frequency. The effectiveness of the physical characteristics of the echosounder (transducer type, operation frequency, etc) is discussed.

## 1. Introduction

The Bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) lives in the western Atlantic Ocean, Mediterranean Sea and Black Sea, and has been object of increasing commercial interest in the last decades. Since the nineties, an alternative to the direct fishing has been the capture and fattening of Bluefin Tuna (*Thunnus thynnus*), developed in the Mediterranean, mainly in the Region of Murcia. The adults are captured in spawning areas from May to July and transported to floating cage facilities. There the tuna are fed actively with low commercial price raw fish in order to increase their fat content and to be sold at a high price, mainly in the Japanese market. Researchers of the IEO (Spanish Oceanographic Institute) wanted to monitor the spawning behavior of 40 captured fish in order to carry out the project REPRODOTT (Reproduction and Domestication of *Thunnus thynnus*) 5<sup>th</sup> Frame Program European project. The interest of the study was focused in the possible courtship activities close to the surface that should take place between the last week of June and the first of July. It is well known [1] that acoustical systems like echosounders can be used as a non-invasive tool to observe the behavior of the fish, to obtain TS (Target Strength) data and biomass estimations, to check temporal-spatial distribution, etc, and, during the period from February to July of 2005, a tuna feeding cage was monitored using a single beam echosounder. Preliminary analysis of the results were performed revealing vertical excursions coincident with daily feeding and rest cycles [3,7]. We have extended the analysis to determine the evolution during the feeding period of the tuna target-strength distribution and also to find some indicators of

the activity of the animals during the courtship period, such as the rate and speed of passage of the tuna across the acoustical beam. Some efforts have been made in the wild with different tuna species [5,6], but there is an important lack of information regarding the Bluefin Tuna.

## 2. Materials and methods

The measurements were taken with a Simrad EY500 echosounder placed down-looking on the sea surface in the centre of the sea cage (25 meters of diameter and 20 meters deep). The acoustic beam was emitted by an elliptical 38 kHz transducer covering an area at 20 m deep of 23.52 m<sup>2</sup>.

The measurement period was: 14 hours in February, nine days in March, four days in April, six days in June and four days in July. This calculation was made by counting all the hours that the sonar was in use.

The parameters of the transducer and the settings of the EY500 echosounder are given in Table 1.

The Sonar5 [4] post-processing software was used to detect the echo signals and make measurements of TS descriptors in the acoustic data. This software package can be used for three main tasks: abundance estimation (biomass estimation and counting); species behavior studies and physical studies. It is specifically designed to identify and count single fish tracks. The single echo detector and envelope detector provide an improved single echo detection echogram (SED echogram) and envelope echogram (AMP echogram). A SED echogram can be used for single echo detection and tracking

methods and an AMP echogram can be used for image analysis.

Before analyzing the data, noise (reverberation, bubbles, etc) and unwanted echoes were eliminated. The cross-filter detector (CFD) method was applied to detect echosounder data with low signal to noise ratio in the course of analysis. The main parameters of the filters (Table 2) were proved to be the optimal settings by pre-analysis.

Once thresholds have been applied for tracking is applied automatically and the detected targets are stored. The characteristics of the detections (Table 3) determine the desired size of the tracks and which to be taken into account in further analysis.

Calibration parameters	Value Setting
Absorption coefficient (dB/km)	8.7
Two-way beam angle (dB)	-14
TS Transducer gain (dB)	20
Sv Transducer gain (dB)	20
Electric Power (W)	500
Pulse-width (ms)	1
Transducer Frequency (KHz)	38
Beam width (degrees)	22 x 11
Angle sensitivity (degrees)	13
Beam type	Single beam

Table 1 Echosounder and transducer parameters

Cross-filter parameters	Value Setting
Threshold of Amp (dB)	-35
Threshold of SED (dB)	-40
Time Varied Gain (TVG)	40log(R)

Table 2 Main value setting of Cross-filter parameters for single-echo detection (SED)

Once obtained the echograms with the desired detections they are recounted separately according to the month of measurement. Detections are obtained in February 1601, 33354 in March, 36643 in June and 17744 in July. The data obtained in April were discarded because they had too much noise and no tracks could be detected clearly, probably have running a generator or any electronic system close to the sonar at the time of measurement.

On the other hand, it should in mind that each month the operating time of the echosounder is different; this can affect the results in the absence of a similar distribution.

Characteristic of detections	Value Setting	
	Minimum	Maximum
Perimeter length (pings)	1	400
Track length (pings)	4	30
Mean echo length	0.8	5
Mean Intensity (dB)	-40	0
Max. Ping gap (pings)	2	
Gating Range (m)	0.4	

Table 3 Characteristics of detected targets

### 3. Results

We present three types of results: target strength distributions along time, from February to July ( when the animals were sacrificed and measured to obtain biometric data), TS dependence with depth inside the cage, and position and activity (speed) indicators related to the courtship period.

The reported results correspond to the data recording periods described in Table 4.

Month	Days	Detected traces
February	1	1601
March	9	33354
April	3	None
June	6	36643
July	4	18661

Table 4 Acoustic recordings description per month

Unfortunately almost all the recordings of April are affected by strong noises, apparently of electromagnetic origin and it has been impossible to obtain useful information from them.

#### 3.1 TS distributions and time evolution

The size and characteristics of tuna make impossible to manipulate them to perform biometric measurements during the feeding period, and at the time of the experiments no video-based system was available to obtain size distribution information previous to the sacrifice. Therefore, the morphological data were measured directly from the tuna under study when the

term of measurements ended, giving the fork length distribution of Figure 1.

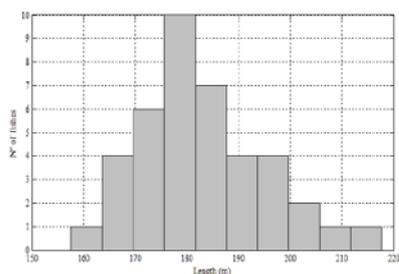


Figure 1 Histogram of fork length versus number of fishes

The average fork length was 182 cm with a standard deviation of 7%, the average weight was 120 kg with a standard deviation of 24%.

We have analyzed the TS strength distributions considering the maximum TS of each trace and the average TS of each trace and its evolution during the study period; all distributions are unimodal and there is not sensitive variation during the feeding period, being the average TS practically constant. Figure 2 shows two typical histograms (March and July) with very similar means. Figures 3 and 4 show the average of the mean TS of each trace and the average of the maximum TS of each trace for the months of the study.

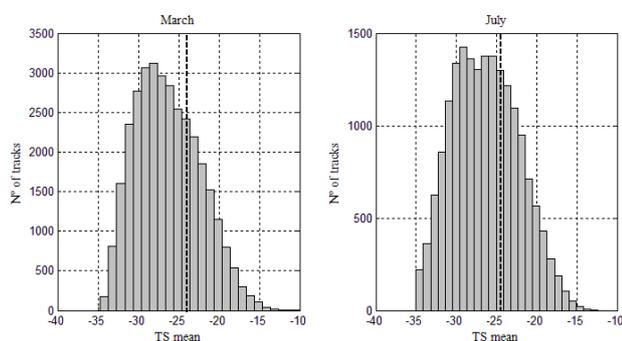


Figure 2 Histograms of mean TS of traces in March and July, the dashed line corresponds to the mean of distributions

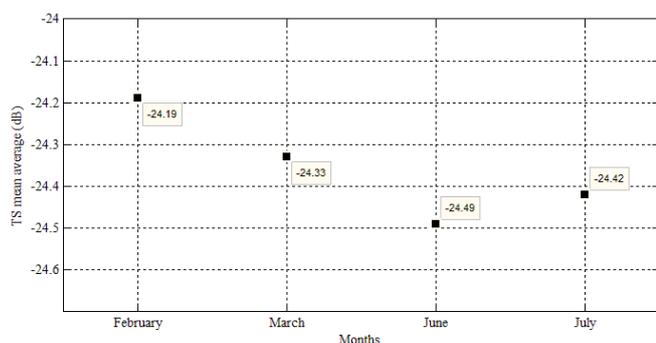


Figure 3 Average TS mean in detected tracks

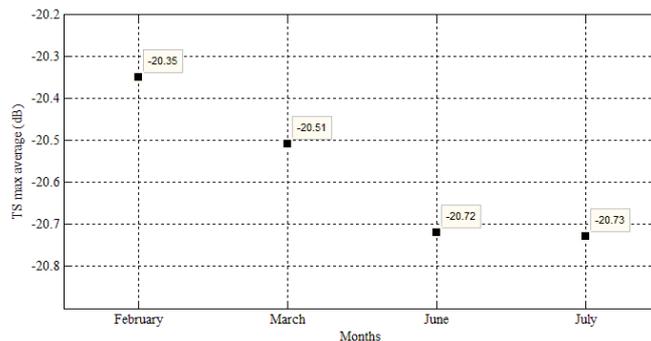


Figure 4 Average TS maximum in detected tracks

Dorsal TS mean of the Bluefin Tuna with this average size of 182 cm is between -24 and -25 dB, while the TS maximum is around -20.5 dB. All standard deviations of TS are around 20%, what reveals that the variations of dorsal TS of tuna along the feeding period are negligible and no correlation is found with the possibly obtained fattening.

### 3.2 TS versus depth

Since the size of tuna is of the order of the beam dimensions at most distances, we study the average TS dividing the echogram in 1 m layers (from surface to 20 meters deep where is the base of the sea cage). It can be seen that increasing the depth the TS values increases until it reaches a distance where it seems to stabilize (10 to 20 m) (Figure 5).

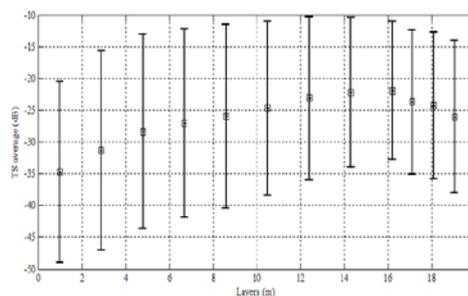


Figure 5 Average TS and standard deviation in echoes detected in July

We have included in Figure 5 the standard deviation bars, which are large, as it happens with the standard deviations of the TS mean and TS maximum of Figures 3 and 4 (not depicted to visualize the small differences).

### 3.3 Courtship monitoring

One of the open questions in the REPRODOTT project was to state if the captive tuna had had courtship or reproductive activities. It is known that tuna perform those activities in the period between the end of June and the beginning of July, in zones close to the surface and

between 2:00 and 5:00 AM. During the courtship the tuna male (just 2 or 3 of them) pursuit the females at high speed, and it seems that the fact that a reduced group starts the reproduction induces the rest to do the same.

We have tried to detect such behavior by analyzing the number of traces as a function of position, the frequency of track detection and a statistics of the track duration (in terms of the number of pings per track).

Figure 6 shows an indicator of the increment of the activity of tuna, comparing between March (as reference) and the last week of June/first of July the number of tracks detected in periods of 10 minutes, in the 3 hours interval of interest. It is noticeable the rise of the activity about 3:50 AM in June-July.

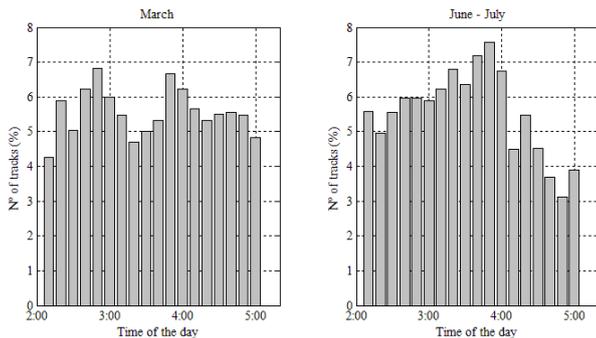


Figure 6 Tracks per 10 minutes during the hours of courtship; March (left), June-July (right)

Figure 7 shows the position of the tracks detected during the “courtship time” for the same months. The histogram shape is clearly different, being the average position closer to surface, but with a more uniform distribution around the centre of the cage, avoiding the bottom. The numbers of tracks collected in the 6 first meters are 614 in March and 1146 in June-July, 46% more.

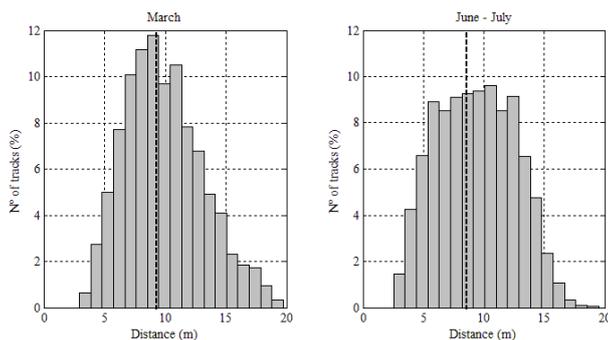


Figure 7 Histograms of tracks versus distance to transducer in the period 2:00 to 5:00 AM.

In principle we assumed the analysis of statistics of the track duration in terms of pings could provide an indirect measurement of the passage speed across the beam; the single beam echosounder can not register angular position in the beam and reproduce the trajectory (like split-beam do), which could be a smart way of measuring the

velocity, but a significant increase of short tracks in the “courtship time” could be a nice indicator. Nevertheless the preliminary analyses are inconclusive. In spite of that, the first two indicators, position and rate of tracks, suggest strongly that courtship activities took place in the expected period.

## 4. Conclusions

We have obtained a great number of measurements of Bluefin Tuna tracks (dorsal aspect) in feeding cages at 38 kHz with a single beam scientific echosounder. The data show unimodal distributions of the target strength Bluefin Tuna, with means of the maximum TS of each track around -20.5 dB for 182 cm animals (fork length average).

The mean TS, both evaluated from single-echo or from tracks, remained practically constant during the feeding period, without reflecting any possible (expected) fattening of the animals.

We propose to extend this study to ventral measurements including a video-based system to collect correlated biometric data.

In spite of the size of the animals and the possible range errors due to the near-field distance, the TS seems to be quite constant for measuring distances from 10 m to 20 m.

The analysis of the position and frequency of tracks during the early morning of the last days of June/beginning of July revealed that the tuna could maintain courtship and reproductive activities.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to Magdalena Iglesias and Joan Miquel (IEO-Baleares) for their support. The REPRODOTT project (Contract Q5RS-2002-01355) was supported by the European Commission RTD 5th FP. Thanks too to Helge Balk, professor at the University of Oslo and Sonar5\_Pro software creator, for his assistance and cooperation.

## REFERENCES

- [1] D. N. MacLennan, E. J. Simmonds, "Fisheries Acoustics". London: Chapman & Hall (1992)
- [2] E. Ona "Methodology for Target Strength Measurements", *ICES Cooperative Research Report* 235 (1999)
- [3] F. de la Gándara, J. Miquel, M. Iglesias, A. Belmonte, E. Ayora, A. García-Gómez, "Using Echosounder system to study the vertical movements of captive bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) in floating cages", *European Aquaculture Society Special Publication* 35:171-172
- [4] H. Balk, T. Lindem, "Sonar4 and Sonar5\_Pro Post processing systems, Operator manual v. 5.9.8", *University of Oslo, Norway* (2008)
- [5] A. Bertrand and E. Josse, "Acoustic estimation of longline tuna abundance". *ICES Journal of Marine Science*, 57: 919–926. J. (2000)
- [6] E. Josse and A. Bertrand, "In situ acoustic target strength measurements of tuna associated with a fish aggregating device". – *ICES Journal of Marine Science*, 57: 911–918. (2000)
- [7] M. E. Nucci, C. Costa, M. Scardi, S. Cataudella, "Preliminary observations on bluefin tuna (*Thunnus thynnus*, Linnaeus 1758) behaviour in captivity", *Journal of Applied Ichthyology*, 26, 95-98 (2010)